



Universidad
Carlos III de Madrid

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Tecnología Electrónica

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE VELOCIDAD
PARA MICROMOTOR PODOLÓGICO CON
MODULACIÓN PWM

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Sergio Calvo Jiménez

Tutor: Luis Hernández Corporales

Leganés, Septiembre 2016





AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Fin de Grado supone la culminación de muchos años de trabajo y aprendizaje tanto profesional como personal. Este camino no lo podría haber recorrido sin la ayuda y el apoyo de muchas personas.

Quiero agradecer la dedicación y pasión de todos aquellos profesores y profesoras que, a lo largo de mi educación, me han transmitido con entusiasmo sincero sus conocimientos y me han motivado a superarme día a día. Especialmente quiero agradecer la dedicación de Luis por proponerme este proyecto y por su pasión transmitida en sus clases.

A mis compañeros Diego, Domingo, Carlos, Nacho y Álvaro, por acompañarme en la aventura que supone la universidad, por hacer el camino más ameno.

A Irene, por el apoyo incondicional, por hacer que los tropiezos se conviertan en motivaciones.

A mi hermano, Ismael, por ser ejemplo al que seguir, por hacerme pensar.

A mis padres, Esperanza y Jose, por su empeño por enseñarme que la educación es el camino a la superación personal, por su paciencia infinita. En definitiva, por todo.





ABREVIATURAS

C.C.	Corriente Continua
C.D. ó D.C.	Corriente Directa
f.e.m.	Fuerza electromotriz
MIS	Cirugía de Mínima Incisión (Minimal Incision Surgery)
ICD	Clasificación Internacional de Enfermedades (International Classification of Diseases)
PWM	Modulación por ancho de pulsos (Pulse Width Modulation)
SW	Software
HW	Hardware
MOSFET	Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect)
ICE	Entorno de Desarrollo Integrado (Integrated Drive Electronics)
ADC	Convertidor Analógico Digital (Analogic Digital Converter)
LED	Diodo emisor de luz (Light-Emitting Diode)



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
ABREVIATURAS	5
ÍNDICE	6
ÍNDICE DE IMÁGENES	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Fundamentación del proyecto	13
1.2 Objetivos	13
1.3 Funcionalidad del proyecto.....	14
2. ESTUDIO DEL SISTEMA.....	15
2.1 Motores de Corriente Continua	16
2.2 Instrumentación médica	20
2.3 Instrumentación en podología.....	23
2.4 Control de un motor de corriente continua con modulación PWM	26
2.5 Control de sistema	29
3. DISEÑO DEL SISTEMA.....	31
3.1 Diagrama de bloques	32
3.2 Funcionalidad.....	33
3.3 Requisitos del sistema	35
3.3.1 Motor	35
3.3.2 Tensión de alimentación	36
3.3.3 Corriente	38
3.3.4 Control de potencia	38
3.3.5 Microcontrolador	39
3.3.6 Sensores de Tensión y Corriente.....	41
3.3.7 Control de usuario	42
4. DISEÑO HARDWARE	43
4.1 Esquema eléctrico.....	44
4.2 Etapa de potencia	45
4.3 Motor	47
4.4 Control de potencia	47
4.5 Sensor de tensión	48
4.6 Sensor de corriente.....	50
4.7 Control de usuario	53
4.8 Microcontrolador Arduino	56



5. DISEÑO SOFTWARE	59
5.1 Diagramas de flujo	60
5.2 Funcionalidad del Software	66
5.2.1 Entorno de desarrollo	66
5.2.2 Variables y constantes utilizadas	66
5.2.3 Rutina de configuración	67
5.2.4 Rutina principal	67
5.2.5 Funciones	70
5.2.5.1 modo_funcionamiento(int a, int b)	70
5.2.5.2 conf_valores(int a, int b)	71
5.2.5.3 segmentos(int a)	71
5.2.6 Comunicación Puerto-Serie	72
6. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	73
6.1 Diseño circuito eléctrico	74
6.2 Diseño PCB	75
6.3 Montaje del proyecto	79
6.4 Ensayos y medidas	80
6.5 Manual de usuario	88
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	92
8. PRESUPUESTO Y CRONOGRAMA.....	95
8.1 Presupuesto	96
8.2 Cronograma	98
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
10. ANEXOS.....	102
I. Diagrama de bloques del sistema	103
II. Plano del esquema eléctrico	104
III. Fotolito PCB.....	105
IV. Código Software.....	106
V. Lista de materiales (BOM).....	113
VI. Hojas de características de componentes.....	114
i. AD620	114
ii. TL2575HV-05.....	116
iii. IRF530.....	118
iv. Display 7 segmentos.....	
VII. Listado de programas	122

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Sistema implementado.....	14
Imagen 2: Principio de Inducción.....	17
Imagen 3: Esquema de Rotor	18
Imagen 4: Micromotores podológicos	26
Imagen 5: Visualización Señal PWM.....	27
Imagen 6: Esquema eléctrico de un transistor.....	28
Imagen 7: Diagrama de un sistema de control de Bucle Abierto	29
Imagen 8: Diagrama de un sistema de control de Bucle Cerrado	30
Imagen 9: Diagrama de bloques del sistema	32
Imagen 10: Micromotor podológico utilizado.....	35
Imagen 11: Visión detallada de microcontrolador Arduino UNO	41
Imagen 13: Esquema eléctrico de la etapa de potencia	45
Imagen 14: Esquema descriptivo TL2575HV-05	45
Imagen 15: Esquema eléctrico del regulador de tensión TL2575.....	46
Imagen 16: Esquema eléctrico de condensador-diodo para el motor.....	47
Imagen 18: Divisor de tensión	48
Imagen 19: Esquema eléctrico del sensor de tensión	49
Imagen 20: Esquema eléctrico del sensor de corriente.....	50
Imagen 22: Interruptores de la etapa de control de usuario.....	53
Imagen 23: Potenciómetro de la etapa de control de usuario.....	54
Imagen 24: LEDs de la etapa de control de usuario	54
Imagen 25: Esquema eléctrico del Display 7 segmentos.....	55
Imagen 26: Visión esquemática de Arduino UNO	56
Imagen 27: Comportamiento del sistema para distintos valores de variación PWM.....	69
Imagen 28: Numeración de segmentos del display.....	71
Imagen 29: Esquema eléctrico general.....	74
Imagen 30: Visión primaria del diseño PCB.....	75
Imagen 31: Rutas y PADs del circuito impreso PCB parte 1.....	76
Imagen 32: Rutas y PADs del circuito impreso PCB parte 2.....	77
Imagen 33: Fotolito.....	78
Imagen 34: Placa PCB impresa.....	79
Imagen 35: Componentes instalados en placa PCB.....	80
Imagen 36: Vista general del sistema implementado.....	80
Imagen 37: Display en diferentes estados y valores de velocidad del sistema	81
Imagen 38: Señal PWM con ciclo de trabajo del 20%.....	82
Imagen 39: Señal PWM con ciclo de trabajo del 60%.....	82
Imagen 40: Señal PWM con ciclo de trabajo del 80%.....	82
Imagen 41: Señal PWM con ciclo de trabajo del 100%	83
Imagen 42: Vista aérea del circuito en estado OFF	84
Imagen 43: Vista aérea del circuito en estado ON y velocidad 3.....	84
Imagen 44: Vista aérea del circuito en estado ON y velocidad 5.....	85
Imagen 45: Gráfica de resultados en pruebas en modo voltaje	86



Imagen 46: Gráfica de resultados en pruebas en modo voltaje y modo corriente	87
Imagen 47: Descriptivo de instalación del microcontrolador Arduino UNO.....	89
Imagen 48: Descriptivo de instalación de cables de alimentación al Arduino	89
Imagen 49: Descriptivo de instalación de cables del micromotor.....	90
Imagen 50: Descriptivo de instalación de cables de alimentación.....	90



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de los LEDs para los estados de funcionamiento.....	55
Tabla 2: Relación de pines utilizados del microcontrolador Arduino.....	57
Tabla 3: Guía de colores para diagramas de flujo	60
Tabla 4: Variables y constantes utilizadas	67
Tabla 5: Pines asignados a los segmentos del display	71
Tabla 6: Valores ajustados de tensión y corriente para las velocidades seleccionadas leídos por el microcontrolador.....	85
Tabla 7: Presupuesto de materiales.....	96
Tabla 8: Presupuesto de personal	97
Tabla 9: Presupuesto total	97
Tabla 10: Cronograma	98





1. INTRODUCCIÓN

1.1. Fundamentación del proyecto

Este proyecto servirá como Trabajo de Fin de Grado y se ha realizado dentro del departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid para el Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

Con este proyecto se pretende estudiar y aplicar físicamente un sistema que permita el control de velocidad de un micromotor podológico gracias a una modulación PWM. Para este control se requerirá la selección de un microcontrolador adecuado. El micromotor podológico será proporcionado por la universidad para la realización de pruebas e implementación del sistema.

El control se realizará sobre un motor de corriente continua, lo que requerirá la realización de un estudio de las tecnologías actuales para el control de motores de corriente continua.

Actualmente, existe una gran variedad de microcontroladores con mayor o menor dificultad de programación, lo que proporciona una gran versatilidad a la hora de seleccionar el microcontrolador y de diseñar el sistema de control para este proyecto.

A parte de la realización de un estudio detallado de las tecnologías a utilizar en este proyecto, se pretende realizar un diseño para su posterior implementación física del mismo, de forma que al final del proyecto el sistema esté perfectamente en operación.

1.2. Objetivos

Después de haber planteado el fundamento de este proyecto, se van a definir los siguientes objetivos a completar durante el proceso del mismo:

1. Realización de un estudio de las tecnologías actuales para el control de motores de corriente continua.
2. Diseño e implementación de un sistema de control PWM de un micromotor podológico.
3. Diseño de software de control PWM con microcontrolador.
4. Implementación física del sistema.
5. Validación experimental del sistema.

1.3. Funcionalidad del proyecto

Una vez implementado este proyecto y conseguido los objetivos, el sistema permite el control de la velocidad de un micromotor podológico de corriente continua gracias a una modulación de señal PWM.

El usuario será capaz de seleccionar manualmente a través de un potenciómetro la velocidad requerida (0-5) del motor. El microcontrolador tomará como referencia esta velocidad seleccionada y regulará el ciclo de trabajo de la señal PWM para controlar así la potencia entregada por el motor.

Este sistema será implementado en una placa PCB, obteniendo como resultado la imagen que se muestra a continuación.

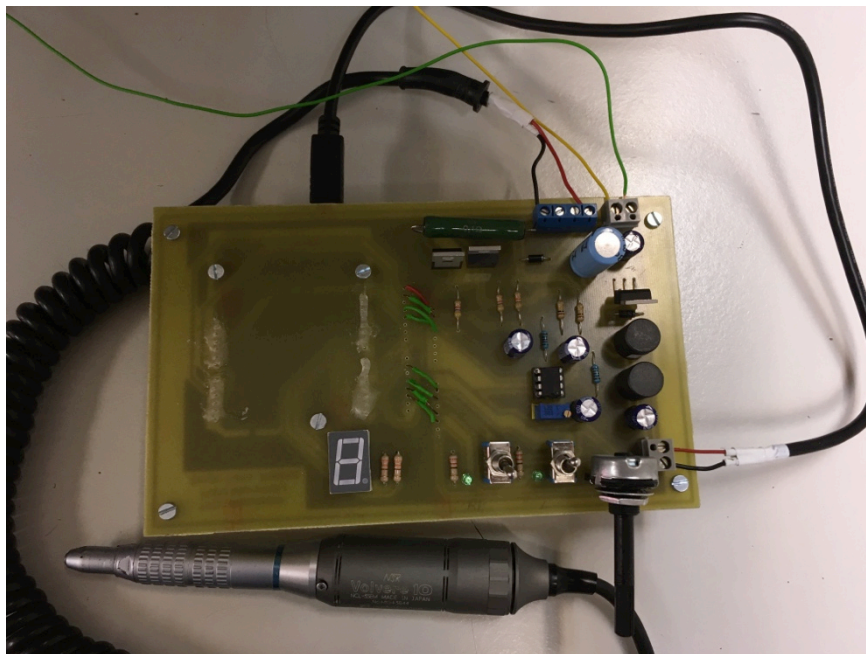


Imagen 1: Sistema implementado



2. ESTUDIO DEL SISTEMA

2.1. Motores de Corriente Continua

HISTORIA Y APLICACIONES

Los motores eléctricos de corriente continua son esencialmente una máquina eléctrica que transforman la energía eléctrica en energía mecánica.

Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios básicos del electromagnetismo, que se empezaron a desarrollar en el siglo XIX. Se puede considerar como punto de partida para el estudio de las máquinas eléctricas el principio de inducción electromagnética, descubierto por Michael Faraday en 1831. Se puede decir que, desde un punto de vista energético, una máquina eléctrica es un convertidor de energía de una forma a otra, una de las cuales al menos es eléctrica, y de acuerdo a ello se clasifican en:

- Generadores: que transforman la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultando una f.e.m. inducida que se aprovecha en el exterior.
- Motores: que transforman la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente de alimentación exterior. La corriente anterior interacciona con un campo magnético inductor, resultando un par que produce el movimiento de la máquina.
- Transformadores: que transforman una energía eléctrica de entrada (de c.a.), con determinada tensión y corriente, en otra energía eléctrica de salida (de c.a.), de magnitudes de tensión y corriente diferentes

El principio de la transformación de energía eléctrica en mecánica (rotación electromagnética), formulado en 1821 por Faraday, sirvió de base para la construcción del motor eléctrico.

Es el motor de corriente continua el que se va a desarrollar a continuación y el que compone la base de este proyecto. Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, par y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Pero con la llegada de la electrónica su uso ha disminuido en gran medida, pues los motores de corriente alterna, del tipo asíncrono, pueden ser controlados de igual forma a precios más accesibles para el consumidor medio de la industria. A pesar de esto, los motores de corriente continua se siguen utilizando en muchas aplicaciones de potencia, como en el sector ferroviario, o de precisión (micro-motores) como en el sector sanitario.

Otra significativa ventaja es la facilidad de inversión de giro de los grandes motores con elevadas cargas, al tiempo que son capaces de actuar de modo reversible, devolviendo energía a la línea durante los tiempos de frenado y reducción de velocidad. Además, tienen tamaños muy reducidos y no contaminan al Medio Ambiente.

FUNDAMENTOS DE OPERACIÓN

Un motor eléctrico opera primordialmente en base a dos principios:

- El principio de inducción, mencionado anteriormente; que señala, que si un conductor se mueve a través de un campo magnético o está situado en las proximidades de otro conductor por el que circula una corriente de intensidad variable, se induce una corriente eléctrica en el primer conductor.
- El principio que André Ampère observó en 1820, en el que establece: que si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica o f.e.m. sobre el conductor.

Por tanto, el movimiento giratorio de los motores de C.C. se basa en el empuje derivado de la repulsión y atracción producido entre los polos magnéticos. Estos polos deben estar alternados entre el estator y el rotor, creando campos constantes y originando un par de fuerzas que obliga a que el rotor gire buscando la posición de equilibrio.

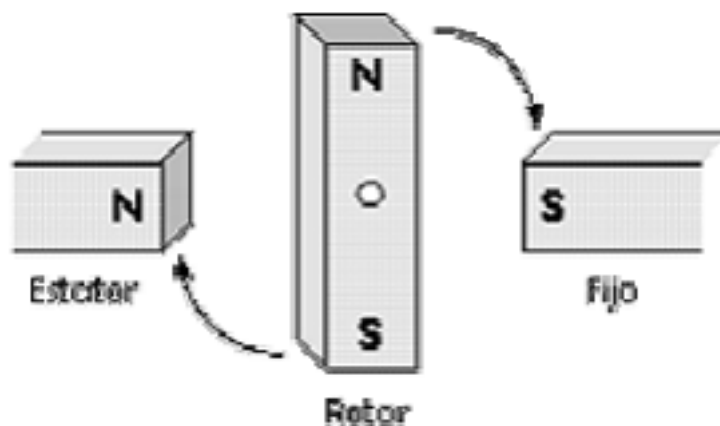


Imagen 2: Principio de Inducción

Gracias a un juego de conexiones entre unos conductores estáticos, llamados escobillas, y las bobinas que lleva el rotor, los campos magnéticos que produce el rotor cambian a medida que este gira, para que el par de fuerzas que lo mueve se mantenga siempre vivo.

El motor trabaja en vacío cuando no tiene acoplado en su eje ningún objeto y no realiza, por tanto, ningún trabajo útil, ya que no arrastra ninguna carga. En estas condiciones, la potencia eléctrica absorbida de la red es mínima. El motor funciona con carga cuando está arrastrando algún objeto que le obliga a absorber energía mecánica.

PARTES DE UN MOTOR DE C.C.

- Estator: es una corona de material ferromagnético en cuyo interior y regularmente distribuidos se encuentran, en número par, los polos inductores, sujetos mediante tornillos a la carcasa. Alrededor de los polos se encuentran unas bobinas, que constituyen el devanado inductor, que al ser alimentados por una corriente continua, generan el campo inductor de la máquina.
- Entrehierro: es el espacio que hay entre el estator y el rotor. Evita el rozamiento entre ambos, aunque debe ser lo menor posible para evitar la elevada reluctancia magnética del aire.
- Rotor: construido con chapas de acero con bajo contenido en silicio, aisladas unas de otras. Está montado sobre el eje de la máquina. En su superficie externa tiene practicadas unas ranuras de una cierta inclinación donde van alojadas las bobinas del devanado inducido de la máquina.

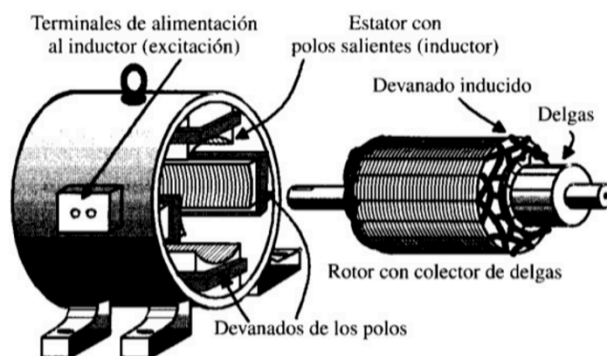


Imagen 3: Esquema de Rotor

- Colector de delgas: va montado sobre el eje de giro y debe disponer de tantas delgas como bobinas tiene el devanado inducido. Cada delga está unida eléctricamente al punto de conexión de una bobina con otra. Las delgas están aisladas unas de otras.

- Escobillas: son los elementos que aseguran el contacto eléctrico entre las delgas del colector y el circuito de corriente continua exterior. Permanentemente están rozando sobre el colector, van sujetas en un collarín portaescobillas que mantiene la presión prevista mediante elementos elásticos para asegurar un contacto adecuado. Esto provoca un desgaste progresivo que acorta su vida útil.

FASES DE FUNCIONAMIENTO

- Arranque: partiendo del reposo, el motor debe vencer el par resistente que se le opone debido a las resistencias de la inercia y rozamientos de los órganos móviles del motor. El motor debe tener un par de arranque mayor. La intensidad captada de la línea puede alcanzar picos muy elevados que pueden ocasionar daños.
- Aceleración: es el periodo en el que el motor va ganando velocidad hasta alcanzar la de régimen nominal. El par motor debe ser elevado para alcanzar la velocidad de funcionamiento normal.
- Régimen nominal: es la fase cuando el motor ha alcanzado su marcha nominal y se mantienen todos los parámetros constantes. En este instante, el par motor debe ser igual al par resistente y de signo opuesto.
- Estabilidad en los motores de C.C.: tras alcanzar el régimen nominal, pueden modificarse los parámetros del motor de forma inesperada, debido a las pérdidas de carga, aumento velocidad, etc. Para que el motor se comporte de forma estable, es preciso que responda a estas variaciones de modo que trate de anularlas para recuperar el régimen nominal.
- Inversión del sentido de giro: el motor puede funcionar en ambos sentidos de giro, para lo que es necesario intercambiar las conexiones de ambos devanados, ya que el sentido del motor depende de la polaridad del campo magnético y de la corriente del inducido.
- Frenado: se puede invertir el sentido del par electromagnético o hacer funcionar al motor como generador, transformando la energía mecánica en energía eléctrica.

2.2. Instrumentación médica

La Instrumentación Médica es una disciplina propia de la Ingeniería Biomédica. Por lo tanto, es importante que el ingeniero electrónico que incursione en esta área del conocimiento, al participar en grupos de Investigación y Desarrollo de tecnologías médicas, o trabaje instalando y manteniendo estos equipos, tenga una visión general de esta área tan importante del conocimiento.

Se puede entonces definir la Ingeniería Biomédica, o Bioingeniería, como la aplicación de las Ciencias Exactas a la preservación y mejoramiento de la salud del Ser Humano. Su propósito es contribuir al progreso de la Medicina y al mejoramiento de la salud por medio de la tecnología.

Debido a su extensa diversidad, las disciplinas dentro de la Bioingeniería se divide en la cercanía con otros campos de la ingeniería más arraigados, los cuales suelen incluir:

- Ingeniería química: asociada con la ingeniería bioquímica, celular, molecular, nuevos materiales y tejidos, etc.
- Ingeniería clínica: asociada con la ingeniería médica o la ingeniería hospitalaria, administración y mantenimiento de equipos médicos en una clínica u hospital.
- Ingeniería electrónica: asociada con la bioelectricidad, bioinstrumentación, creación de imágenes, e instrumentación médica.
- Ingeniería mecánica: asociada con la biomecánica, biotransporte y con el modelado de sistemas biológicos.
- Óptica e ingeniería óptica: imagen e instrumentación.

HISTORIA DE LA INSTRUMENTACIÓN MÉDICA

A continuación se muestra cronológicamente los principales desarrollos de la tecnología biomédica:

1895: W.K. Roentgen descubre los Rayos X. Inicialmente se usaron para diagnosticar fracturas y dislocaciones de huesos. En 1930 se podían visualizar prácticamente todos los órganos del cuerpo gracias al uso de materiales radiopacos o de contraste.

1903: W. Einthoven desarrolló el primer electrocardiógrafo para medir la actividad eléctrica del corazón. Aplicando descubrimientos en las ciencias

aplicadas al análisis de procesos biológicos, se inició una nueva era en las técnicas de medicina cardiovascular y mediciones eléctricas.

1927: Se introduce el primer respirador artificial en procedimientos quirúrgicos.

1939: Se desarrolló el primer bypass corazón – pulmón.

1935 – 1939: Se desarrolló la sulfanilamida y la penicilina disminuyéndose el principal peligro de la hospitalización en la época: las infecciones.

1940: Los procedimientos médicos de alto riesgo dependen mucho más de la tecnología médica. Se desarrolló la caterización cardiaca y la angiografía, que consiste en la introducción de una cánula a través de la vena de un brazo hasta llegar al corazón.

1945 en adelante: Después de la II Guerra Mundial, los avances tecnológicos fueron impulsados por la investigación en el campo militar. Como producto de esos esfuerzos, la profesión médica se benefició pues se han estado desarrollando continuamente nuevos dispositivos, equipos y sistemas puestos al servicio de la salud.

Actualmente, la meta de los ingenieros biomédicos se centra en el desarrollo de prótesis para mejorar la calidad de vida del hombre. En este campo, se está desarrollando ampliamente la tecnología de impresión 3D. También, los adelantos en nuevos materiales, especialmente orgánicos, han permitido el desarrollo de nuevos dispositivos médicos.

CLASIFICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN MÉDICA

Los principales equipos electrónicos que componen la instrumentación médica pueden dividirse en los siguientes tipos:

- **Amplificadores de biopotenciales:** este tipo de amplificadores se utilizan para la obtención de los biopotenciales captados por electrodos, realizando la adaptación de impedancias, mejorando la relación señal/ruido y proporcionando una señal de salida de suficiente amplitud para ser visualizada y registrada. Los equipos más utilizados son: electrocardiógrafos, electroencefalógrafos y amplificadores para electromiograma.
- **Procesadores de señal:** se incluyen aquellos sistemas de instrumentación médica que realizan funciones de procesamiento, tanto analógico como digital, más complejas para la obtención de la señal deseada. Destacan los cardiotacómetros, monitores cardíacos y equipos para la obtención de potenciales evocados.

- Estimuladores eléctricos: se encuentran entre los sistemas de instrumentación médica utilizados con fines terapéuticos o como prótesis. Existe una gran cantidad de tipos, desarrollados para distintas aplicaciones, entre las que pueden destacar los cardíacos (marcapasos), musculares, nerviosos, auditivos, etc.
- Desfibriladores: la desfibrilación eléctrica se realiza a través de instrumentos médicos situados directamente sobre el corazón (implantados) o a través del tórax (externos).
- Instrumentación quirúrgica o invasiva: son aquellos dispositivos utilizados para sustituir a otros clásicos como el bisturí clásico utilizados en cirugías, en odontología, podología, etc. El objeto de estudio en este proyecto pertenece a este último grupo.

REQUISITOS DE SEGURIDAD

Actualmente existen diversas regulaciones que definen las condiciones de seguridad que deben cumplir los equipos de utilización médica para obtener el marcado que les permite su comercialización. En la Unión Europea, el aseguramiento en la calidad de la producción se rige por las series EN 29000 y EN 46000, y la seguridad técnica por la EN 60601.

El objetivo de la seguridad es reducir el riesgo para el paciente, el operador, el entorno, el equipo y la instalación. Los riesgos pueden tener un origen eléctrico, o deberse a radiaciones, errores en la utilización del equipo, averías de componentes u otros. En la instrumentación biomédica, la situación se ve agravada por:

- Sensibilidad del paciente a determinadas formas de energía, porque la realización de una medida o tratamiento pueden privarle de sus defensas naturales.
- El personal médico puede estar sometido a exposiciones repetidas, como ocurre en sistemas de radiología.
- Capacidad limitada de absorción de energía del cuerpo humano. Por ello, para cada acción no debe usarse más que la adecuada a la finalidad pretendida.

Para alcanzar la seguridad deseada es necesario incorporar protecciones en el equipo, tomar medidas suplementarias externas y adoptar precauciones en la instalación o utilización.

En el caso específico de la seguridad eléctrica y electrónica los principales requisitos son:

- Seguridad: aislamiento básico, separación entre circuitos y cubierta del aparato; corrientes de fugas y resistencia del dieléctrico.
- Selección de componentes: fuente de alimentación, transformadores y fusibles.
- Construcción: cubierta externa, electrodos y conexiones con el paciente, conexión con la red.
- Pruebas de funcionamiento: continuidad de la conexión con tierra, potencia de entrada y limitaciones de voltaje y energía.
- Compatibilidad electromagnética: inmunidad a interferencia de radiofrecuencia, inmunidad a descargas electrostáticas e inmunidad a transitorios.
- Requerimientos especiales: hacen referencia a la conexión con computadoras, aspectos de seguridad del software, limpieza del sistema o documentación anexa (información y descripción técnica).

2.3. Instrumentación en podología

Como se ha comentado anteriormente, este proyecto tiene como objeto el desarrollo de un sistema de control de un motor utilizado para intervenciones podológicas.

La podología es una rama de la medicina que tiene como objeto el estudio, diagnóstico y tratamiento de las enfermedades y alteraciones que afectan al pie. Engloba aspectos como la promoción de la salud integral, la prevención de afecciones y deformidades del pie, y dar respuesta mediante técnicas diagnósticas y tratamientos adecuados.

Al igual que en otros campos de la medicina, como se ha especificado en el punto anterior, actualmente el uso de instrumentación médica tiene un papel fundamental en estos procesos que engloba la podología. Específicamente, la Cirugía de Mínima Incisión o MIS (Minimal Incision Surgery) ha promovido el desarrollo de las técnicas e instrumental podológico.

Las técnicas de cirugía MIS son iniciadas en el año 1945 por Morton Polokoff mediante el uso de pequeñas limas para pulir pequeñas exostosis¹. Estas ideas

¹ Exostosis: hipertrofia parcial, limitada a la superficie de un hueso o diente [ICD-10: M89.9]

serían incorporadas posteriormente por otros cirujanos del pie, como Edwin Propper y Bernard S. Winstock, que serían los que realmente darían el impulso definitivo a la cirugía MIS.

Desde estos primeros indicios hasta nuestros días han aumentado los conocimientos anatómicos, así como las técnicas e instrumentos utilizados para realizar las intervenciones.

Dentro del instrumental del que se puede hacer uso en una intervención de cirugía MIS, así como en otros tipos de tratamientos podológicos, se diferencian tres grupos:

- Instrumental del campo quirúrgico: es el instrumental utilizado para realizar las intervenciones, utilizado principalmente en la mesa quirúrgica y que no lleva incorporado ningún instrumento rotatorio. Estos pueden ser: bisturí, limas, fresas, elevadores, pinzas, tijeras, agujas, etc.
- Instrumental motorizado, micromotor y pieza de mano: estos sistemas motorizados tienen unos terminales capaces de transformar la velocidad y potencia que produce el micromotor en movimientos rotatorios para así poder eliminar superficies óseas mediante el uso de determinadas fresas y sierras de corte con movimientos oscilantes.
- Instrumental de control radiológico: estos permiten indicar por métodos de imagen, la estructura, forma y localización exactas del sitio quirúrgico. Dentro del instrumental de control radiológico hay varios tipos como los Rayos X, intensificadores de imagen y el fluoroscopio, Rayos X que necesitan de menos radiación.

REQUISITOS INSTRUMENTAL MOTORIZADO: MICROMOTOR

Dentro de los tipos de instrumental motorizado se deben seleccionar aquellos que tienen una adecuada relación de la velocidad con la potencia, es decir, que no pierdan potencia con la disminución de velocidad. Algunos de los requisitos que deben cumplir en la utilización de estos instrumentos son:

- Mantener una velocidad de cirugía lo menor posible que permita realizar el gesto quirúrgico programado.
- La potencia del sistema motorizado debe ser la suficiente para vencer la resistencia de la superficie a fresar.
- Mantener las revoluciones por minuto que adquiere la fresa dentro de los márgenes de seguridad, puesto que conforme se aumenta la velocidad de trabajo, aumenta la temperatura de punta de la fresa y

como consecuencia también aumenta la temperatura de los tejidos. Normalmente, los micromotores para podología suelen ofrecer entre 30.000 y 45.000 r.p.m.

- No superar el límite de temperatura de trabajo de 38°C, ya que si se alcanzan temperaturas superiores cercanas a los 50°C se producen necrosis² osteotérmicas, que pueden provocar alteraciones importantes en el tiempo.
- Boquilla desmontable de la pieza de mano para realizar su limpieza. Esta debe llevar incorporados unos anillos de silicona para evitar la entrada de sangre y detritus al interior de la misma
- Las fresas deben quedar bloqueadas mediante una palanca para poder utilizar diferentes tipos de fresas en diferentes maniobras quirúrgicas.
- Pieza de mano esterilizable en autoclave. Se recomienda el uso de una funda de plástico que también sea esterilizada impidiendo el contacto con el cable del micromotor.
- Requiere los cuidados normales de engrasado igual que cualquier otra pieza de mano.

A nivel europeo, los micromotores podológicos deben cumplir los requisitos esenciales de seguridad en Productos Sanitarios en base a las siguientes normas internacionales:

- EN 62366:2009. Dispositivos médicos. Aplicaciones de la ingeniería de aptitud de sus dispositivos médicos.
- ISO 14971:2012. Aplicación de la gestión de riesgos a los productos sanitarios.
- UNE-EN ISO 13485:2013. Productos Sanitarios. Sistemas de gestión de calidad. Requisitos para fines reglamentarios.
- UNE-EN 1041:2014. Información proporcionada por el fabricante de productos sanitarios.
- UNE-EN 60601-1 2012 – Parte 1. Requisitos generales para la seguridad básica y funcionamiento esencial.
- UNE-EN 60601-1-2:2008. Equipos electromédicos. Parte 1-2: Requisitos particulares para la seguridad básica y características de

² Necrosis: muerte de las células y los tejidos de una zona determinada de un organismo vivo.

funcionamiento esencial. Norma colateral: Compatibilidad electromagnética

Actualmente, existe una amplia oferta de micromotores para intervenciones en podología. Destacan fabricantes internacionales como Foredom, Camo, NSK o Sunburst. En España destaca el fabricante Namrol, certificado con la Licencia de Fabricante de Productos Sanitarios.



Imagen 4: Micromotores podológicos

Los precios de los micromotores para podología con las características comunes comentadas, oscilan entre los 180 y 300€.

2.4. Control de un motor de corriente continua con modulación PWM

Como se ha comentado anteriormente, los motores de C.C. son una de las máquinas más versátiles de la industria debido a su fácil control de posición, par y velocidad, convirtiéndolos en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos.

Uno de los métodos más utilizados para el control de estos motores es mediante el uso de una señal PWM o modulación por ancho de pulsos.

Una señal PWM consiste en una señal de onda cuadrada (ver imagen 4) con una amplitud determinada y acotada, y con una frecuencia constante. En esta señal puede variar el ancho de pulso obteniendo una variación en el valor medio de la señal, que está definido por el ciclo de trabajo. Los conceptos que componen la señal PWM, por tanto, son:

- Amplitud: diferencia entre el valor mínimo (V_{\min}) y el valor máximo (V_{\max}) de tensión de la señal.
- Periodo (T): tiempo que tarda la señal en realizar un ciclo completo.

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

- Ancho de pulso (τ): tiempo que la señal se mantiene constante en el máximo valor de tensión.
- Ciclo de trabajo (D): ancho relativo en el valor máximo de la señal en relación con el periodo.

$$D = \frac{\tau}{T}$$

- Valor medio (V_{med}): valor de tensión de salida de la señal PWM.

$$V_{med} = D * V_{max}$$

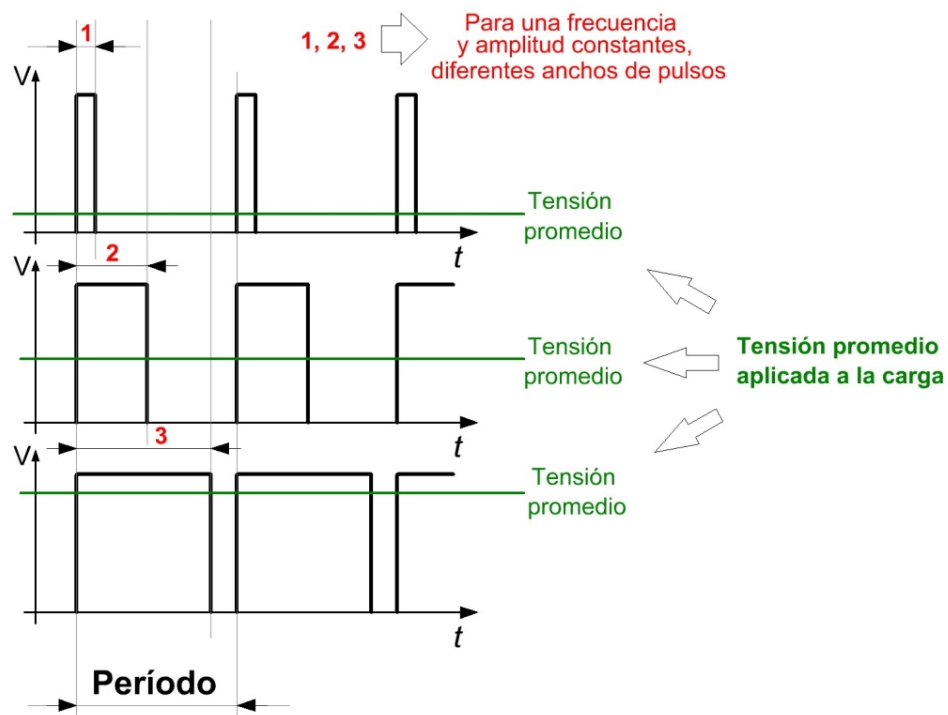


Imagen 5: Visualización Señal PWM

Como se puede observar en la imagen, la primera señal tendría un ciclo de trabajo aproximado del 10% y una tensión promedio de $0,1V_{max}$. En el segundo caso el ciclo de trabajo sería del 50%, puesto que está el mismo tiempo en su valor máximo de tensión como en su valor mínimo. Por tanto, la tensión promedio será la mitad del valor máximo. En la tercera señal se puede observar un ciclo de trabajo aproximado del 90% y una tensión promedio de $0,9V_{max}$.

Para el funcionamiento de un motor de C.C. se necesita de una tensión mínima de arranque por lo que esto hace inviable la variación directa de la tensión de alimentación del motor, puesto que este podría pararse por debajo de esa tensión mínima. Es por esto, por lo que se utiliza la modulación PWM.

Si se aplican muchos impulso de forma reiterada, conectando y desconectando la alimentación, varias veces por segundo, el motor comienza a girar y por la propia inercia del sistema acoplado a su eje, se mantendrá en marcha según el régimen de eventos de conexión-desconexión que se aplique por segundo.

Así, para un ciclo de trabajo del 50%, el motor funcionará a la mitad de la velocidad máxima permitida.

Para el tipo de conmutación que se requiere en este tipo de sistemas con una frecuencia elevada, una llave mecánica o relé resultan imposibles de utilizar. Por tanto, se utiliza el transistor para realizar esta conmutación. La señal PWM llega al transistor que está acoplado a la línea de alimentación y al motor según se puede observar en la siguiente imagen.

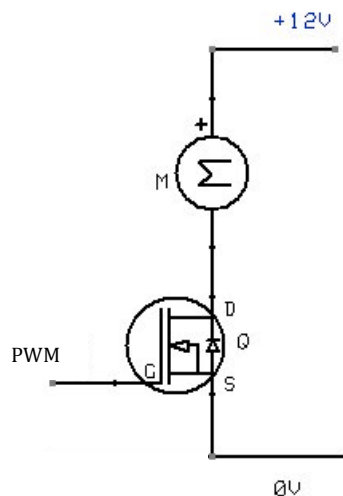


Imagen 6: Esquema eléctrico de un transistor

Para la modulación PWM se utilizan normalmente transistores de tipo MOSFET que poseen destacadas características que los hacen ideales para este tipo de aplicaciones, por ejemplo el transistor IRFZ44N o el IRF530. Sin embargo, también pueden aplicarse transistores bipolares (NPN – PNP), tiristores, etc. según la conveniencia de la aplicación dependiendo de la corriente, la frecuencia, temperatura, etc.

2.5. Control del sistema

Un sistema dinámico puede definirse conceptualmente como un ente que recibe unas acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida.

Dentro de los sistemas, se encuentra el concepto de sistema de control. Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados de consigna.

Existen dos tipos de sistemas de control:

- Sistemas de control de Bucle Abierto.

Son aquellos sistemas en los que la variable de salida, o variable controlada, no tiene efecto sobre la acción de control, o variable de control.

En estos sistemas no se compara el valor real de salida con el valor deseado de salida, o valor de referencia. Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación previamente fijada. Por tanto, la exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador y ante perturbaciones, estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.

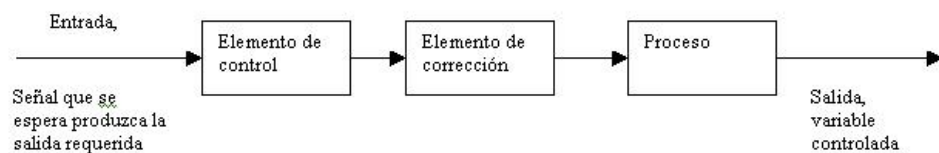


Imagen 7: Diagrama de un sistema de control de Bucle Abierto

El control en lazo abierto suele aplicarse en dispositivos con control secuencial, en los que no hay una regulación de variables, sino que se realizan una serie de operaciones de una manera determinada.

- Sistemas de control de Bucle Cerrado.

Son aquellos sistemas de control en los que la señal de salida del sistema, o variable controlada, tiene efecto directo sobre la acción de control, o variable de control.

Esto se efectúa a través de una realimentación que lee constantemente el valor real de salida del sistema. En presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia. Esta reducción se logra manipulando alguna variable de entrada del sistema, siendo la magnitud de dicha variable de entrada función de la diferencia entre la variable de referencia y la salida del sistema.

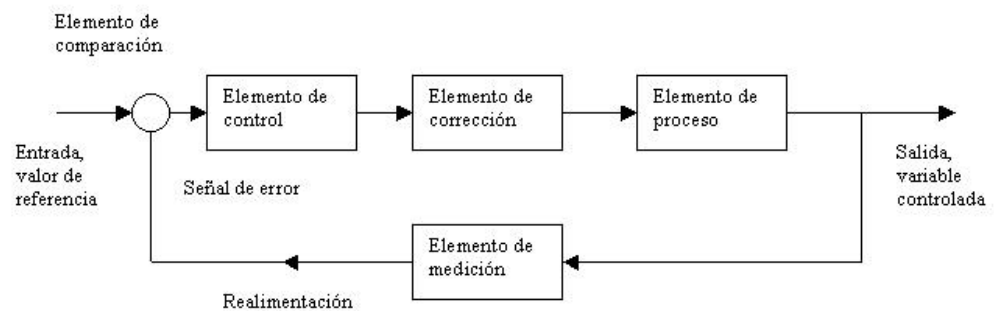


Imagen 8: Diagrama de un sistema de control de Bucle Cerrado

La lectura del valor de la salida del sistema, elemento de medición, se realiza a través de sensores que adapta la señal, analógica o digital, a un valor que pueda ser leído por el sistema para la realimentación.

El sistema de control utilizado en el presente proyecto de modulación PWM de un motor de C.C. es de tipo Bucle Cerrado.

La variable de entrada a este sistemas será la señal PWM, mientras que las variables controladas, o de salida, serán la corriente que circula por el motor y la tensión del mismo. Se podrá conmutar entre los dos sistemas de control dependiendo de la variable que se quiera controlar. Las variables serán leídas por respectivos sensores que retroalimentarán al sistema de control implementado en el microprocesador elegido, como posteriormente se detalla en este proyecto.

En los sistemas de control de motores de C.C. es frecuente que una de las variables controladas de salida sea la velocidad de giro del propio motor. Sin embargo, en este proyecto no se realizará el control de la velocidad puesto que sería necesario la instalación de un tacómetro acoplado al motor que pudiera leer la velocidad del mismo.



3. DISEÑO DEL SISTEMA

3.1. Diagrama de bloques

A continuación se representa el diagrama de bloques del sistema implementado en este proyecto.

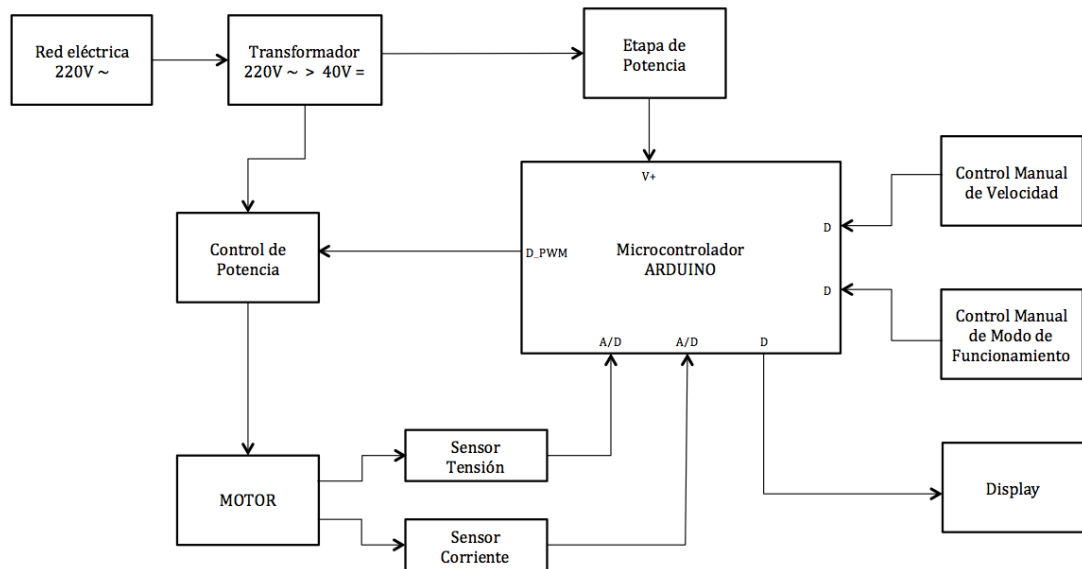


Imagen 9: Diagrama de bloques del sistema

*Para ver el diagrama a tamaño A4 ir a Anexo I.

Las partes o bloques que conforman el sistema son:

- Red eléctrica: la red eléctrica española proporciona una señal de 230v de corriente alterna.
- Transformador: es alimentado por la red eléctrica y se encarga de convertir los 220V de C.A. en 48V de C.C. Es una fuente regulable de 60V máximos de salida.
- Etapa de potencia: reduce la tensión de salida del transformador de 48V a 5V de C.C. que alimentarán el microcontrolador Arduino.
- Microcontrolador Arduino: microcontrolador donde se compila el software encargado del control del sistema. Consta de entradas y salidas analógicas y digitales.
- Control de potencia: sistema encargado de transmitir la señal PWM, generada en el microcontrolador, al motor para controlar la corriente que le llega al mismo.
- Motor: es el componente activo sobre el que se desea actuar.

- Sensor de tensión: transmite la tensión que cae en el motor al microcontrolador.
- Sensor de corriente: transmite la corriente que circula por el motor al microcontrolador.
- Control manual de velocidad: consta de un potenciómetro desde el que el usuario podrá seleccionar la velocidad que desea.
- Control manual de modo de funcionamiento: consta de dos interruptores desde los que el usuario podrá seleccionar el modo deseado de control: por tensión, por corriente, apagado.
- Display: conjunto de componentes desde los que el usuario podrá ver el modo de funcionamiento y la velocidad seleccionada en cada momento.

El conjunto del sistema será descrito detalladamente en próximos apartados del proyecto.

3.2. Funcionalidad

Como se ha detallado anteriormente, el objetivo de este proyecto es modular un micromotor podológico con una señal PWM de acuerdo a los valores de tensión o corriente leídos.

ALIMENTACIÓN

El sistema está compuesto por una parte de alimentación que proporciona la potencia requerida para hacer funcionar el micromotor y el resto del sistema de control a través del microcontrolador.

El sistema de alimentación está conectado a la red eléctrica a través de un transformador. La red eléctrica española proporciona una tensión de C.A. de 230V y 50Hz de frecuencia. El transformador toma esta tensión de entrada para convertirla en una señal de C.C. de tensión variable que puede alcanzar los 60V. Para este proyecto se utiliza una señal de salida del transformador de 48V, que es la tensión nominal de alimentación del micromotor utilizado.

Por otra parte, se necesita una señal de alimentación de 5V para el microcontrolador Arduino. Por lo que se implementa una etapa de potencia que reduce la señal principal de alimentación a la salida del transformador para adecuarla a la alimentación del microcontrolador.

CONTROL DE POTENCIA DEL MOTOR

El motor, por tanto, está alimentado a una tensión de 48V. Sin embargo, esta alimentación es controlada por una etapa de control que consta de unos transistores MOSFET que actúan como un interruptor abierto/cerrado. Estos transistores son conmutados por la señal PWM que envía el microcontrolador Arduino.

Como se ha explicado en capítulos anteriores, si la señal PWM tiene un ciclo de trabajo del 0% (valor medio mínimo), la etapa de control funcionará como un interruptor abierto y la caída de tensión en el motor será nula, es decir, el motor se encuentra en reposo. Por otro lado, si el ciclo de trabajo es del 100% (valor medio máximo), la etapa de control funcionará como un interruptor continuamente cerrado y la caída de tensión en el motor será máxima, es decir, el motor trabaja a su máxima potencia.

El microcontrolador genera la señal de control PWM en función a los valores de velocidad requeridos por el usuario y a los valores de tensión y corriente que circula por el motor. Estos son leídos constantemente, según el modo de funcionamiento elegido (tensión o corriente), por dos sensores para cada una de las señales.

Los sensores leen y envían la señal analógica al microcontrolador que la convierte en una señal digital que pueda ser leída. Las etapas de sensores están implementadas de forma que puedan adaptar la señal leída en el motor para transmitirla al microcontrolador.

CONTROL DE USUARIO

El control de usuario se basa en tres etapas.

La primera de ellas es la selección de modo de trabajo del sistema. El sistema tiene tres modos de funcionamiento:

- Apagado: la señal PWM tiene un ciclo de trabajo del 0% y por tanto, el motor no funciona.
- Tensión: el control de potencia del motor se realiza teniendo en cuenta la tensión que cae constantemente en el motor. Se atiende al sensor de tensión y no al de corriente.
- Corriente: el control de potencia del motor se realiza teniendo en cuenta la corriente que circula constantemente por el motor. Se atiende al sensor de corriente y no al de tensión.

La selección de los modos de funcionamiento se realiza manualmente por parte del usuario con unos interruptores.

La segunda etapa de control del usuario es la selección de velocidad del motor. El usuario puede seleccionar entre 6 velocidades de funcionamiento (0-5) siendo el 0 la mínima velocidad, o motor parado, y la 5 la máxima velocidad, motor a máxima potencia. La selección de velocidad se realiza manualmente a través de un potenciómetro.

El microcontrolador proporcionará la señal necesaria para conseguir mantener la velocidad demandada por el usuario.

Por último, se implementa otra etapa de visualización compuesta por LEDs y displays de forma que el usuario pueda ver en todo momento el modo y velocidad seleccionados.

Todas estas señales de control son transmitidas al microcontrolador, que se encarga de leerlas y actuar de acuerdo a las órdenes del usuario. Para la transmisión de estas señales se utilizan entradas/salidas digitales y analógicas del microcontrolador.

3.3. Requisitos del sistema

3.3.1. Motor

El motor podológico elegido para la realización de este proyecto es el modelo “Volvere 10 NCL-35EM” del fabricante japonés NSK equipado con un cabezal EX-VI del mismo fabricante.



Imagen 10: Micromotor podológico utilizado

El fabricante NSK está especializado en el desarrollo de micromotores clínicos, especialmente enfocados a los tratamientos dentales aunque también disponen de micromotores podológicos como son los de la familia “Volvere”. El modelo utilizado en este proyecto no es el más actual de la familia, puesto que se ha escogido un motor prestado de segunda mano apto para la realización de las pruebas a realizar. Actualmente, el modelo más desarrollado de esta familia es el “Volvere i7”.

Uno de los requisitos básicos del micromotor utilizado es la tensión a la que debe estar alimentado, que son 48V de corriente continua. Por tanto, debe existir un transformador entre la red eléctrica y el motor.

La característica principal que afecta directamente al diseño del sistema de control de este motor es la potencia nominal, siendo de 230W. Esta característica servirá también para el diseño del sistema y para calcular la corriente que circulará por el mismo.

Por tanto, el diseño del sistema de control del micromotor tendrá en cuenta principalmente estas dos características:

- Tensión de alimentación: 48V de C.C.
- Potencia nominal: 230W

Otras características del motor escogido para este proyecto son:

- Velocidad: 1.000 ~ 35.000 r.p.m.
- Torque máximo: 4,1Ncm
- Dimensiones: L125 x Ø23.5 mm (sin cabezal)
L176 x Ø23.55 mm (con cabezal)
- Peso: 200 g (sin cabezal)
255 g (con cabezal)
- Longitud del cable: 1,4 m

3.3.2. Tensión de alimentación

Como se ha visto en el punto anterior, el motor requiere de una tensión de alimentación de corriente continua de 48V. Por tanto, es necesario la presencia de un transformador de tensión que convierta la corriente tomada desde la red eléctrica a la señal que requiere el sistema.

La red eléctrica española proporciona una señal de C.A. de 230V y 50Hz. Como transformador se utiliza una fuente de alimentación regulable con dos salidas que permiten proporcionar una señal de C.C. de hasta **XV** y **YA** cada una. En este caso se utiliza la fuente de alimentación en modo serie de forma que se obtiene la salida deseada de 48V.

Esta señal alimentará directamente al motor controlada por la etapa de control de potencia.

Como se detallará posteriormente, el microcontrolador escogido requiere de una tensión de alimentación de 5V. Con el objetivo de obtener esta señal a partir de la tensión transformada por la fuente de alimentación se debe diseñar una etapa de potencia que reduzca la tensión desde los 48V a los 5V necesarios.

Por tanto, los requisitos básicos que debe cumplir esta etapa son:

- Tensión de entrada mínima: 48V
- Tensión de salida: 5V

De acuerdo a estas necesidades de transformación de la tensión de alimentación del microcontrolador se opta por la utilización del regulador de voltaje de conmutación TL2575-05 o TL2575HV-05 cuyas características son:

- Tensión máxima de entrada: 42V
60V (modelo HV)
- Tensión mínima de entrada: 4.75V
- Tensión de salida: 5V
- Corriente de carga: 0.2 ~ 1 A
- Temperatura máxima de operación: 150°C
- Temperatura mínima de operación: -40°C

A pesar de que ambos modelos cumplen con los requisitos del sistema, se recomienda la utilización del modelo TL2575HV-05 puesto que tiene un mayor rango de tensión de entrada (hasta 60V) y que evita problemas debido a fluctuaciones o picos de la corriente de entrada.

3.3.3. Corriente

Tal y como se ha especificado en puntos anteriores, una característica esencial a la hora de diseñar el sistema de control del motor es la intensidad de corriente máxima que circulará por el circuito. Para obtener este valor se utilizan las características del micromotor escogido, la potencia y la tensión de alimentación del mismo.

El micromotor se alimentará a una tensión máxima de 48V y presenta una potencia nominal de 230W. Por tanto, la corriente máxima que circulará por el circuito será:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{230 \text{ W}}{48 \text{ V}} = 4,79 \text{ A}$$

(Ecuación 1)

Debido a este requisito, se deberá implementar un circuito capacitado para soportar esta corriente máxima de 4,79 A como se detallará a continuación.

3.3.4. Control de potencia

De acuerdo a lo explicado en el punto sobre modulación de un motor con una señal PWM se utilizará un transistor como conmutador para regular la tensión de alimentación del motor.

Para la elección de dicho transistor es importante tener en cuenta los requisitos anteriormente comentados, como la tensión de alimentación y la corriente que circulará por el circuito:

- Tensión máxima Drenador – Fuente (V_{D-S}): 48V
- Tensión máxima Puerta – Fuente (V_{G-S}): $\pm 5V$
- Corriente máxima Drenador – Fuente (I_{D-S}): 5,57 A

Teniendo en cuenta estos requisitos se ha elegido un amplificador MOSFET de tipo IRF530. Este es un amplificador con una alta velocidad de conmutación que lo hace muy conveniente para aplicaciones como la que se desarrolla en este proyecto, puesto que a mayor velocidad de conmutación, mayor será la sensibilidad en el control del motor a través de la señal PWM.

Este transistor presenta las siguientes características:

- Tensión máxima Drenador – Fuente (V_{D-S}): 100V
- Tensión máxima Puerta – Fuente (V_{G-S}): $\pm 20V$
- Corriente máxima Drenador – Fuente (I_{D-S}): 10 A

A pesar de que este transistor tiene las características suficientes para soportar la corriente máxima que circula por el circuito, se recomienda la instalación de dos transistores MOSFET en paralelo de forma que duplican la corriente máxima que son capaces de soportar y, además, evitan el fallo del sistema en el caso de que uno de los dos transistores fallara, manteniendo la velocidad de conmutación.

3.3.5. Microcontrolador

Todas las señales de control, tanto entradas que permitan saber el estado del sistema como salidas que envíen las acciones a realizar, deben ser procesadas por un microcontrolador donde se implementará el programa software encargado de procesar cada una de las señales.

Como se ha visto anteriormente, el sistema está compuesto tanto por señales analógicas, valores de tensión y corriente, como por señales digitales, ceros y unos (representados por valores de voltaje predefinidos).

Posteriormente se detallarán cada una de las señales utilizadas en este proyecto, siendo necesarias:

- 3 señales analógicas.
- 12 señales digitales, al menos una salida PWM.

Por tanto, se debe asegurar que el microcontrolador utilizado disponga de estas entradas/salidas. Además, el microcontrolador debe poder ser reprogramado, siendo recomendable que pueda comunicarse durante la ejecución del programa con una interfaz de usuario facilitando así el desarrollo del software y la resolución de problemas del mismo.

La opción más recomendable para este caso es la utilización de una placa Arduino o similar. Arduino es una compañía que desarrolla microcontroladores en una placa de circuito impreso con diversos puertos digitales y analógicos de entrada/salida, dependiendo de cada modelo, diseñados para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinares. El software consiste en un entorno de desarrollo (IDE)

basado en el entorno de Processing y lenguaje de programación basado en Wiring. Estas placas son de hardware libre, por lo que actualmente existen en el mercado diversas placas idénticas o similares con las mismas funcionalidades.

La facilidad de programación y su coste relativamente bajo, hacen de estas placas una opción ideal para este proyecto. Entre los diversos modelos se ha optado por el Arduino UNO, que presenta las siguientes características:

- Microcontrolador: ATmega328P
- Tensión de operación: 5V
- Tensión de entrada: 5V
- Pines de Entradas/Salidas digitales: 14
- Pines de Entradas/Salidas digitales con PWM: 6
- Entradas analógicas: 6
- Corriente de Entradas/Salidas: 20mA
- Velocidad de reloj: 16MHz
- Memoria Flash (Atmega328P): 32KB
- Memoria RAM (Atmega328P): 2KB

La alimentación del Arduino puede realizarse a través de un conector de fuente de alimentación externa de 5 a 12V o a través del conector USB, también utilizado para la programación y comunicación puerto serie. Se utilizará este medio para la alimentación.

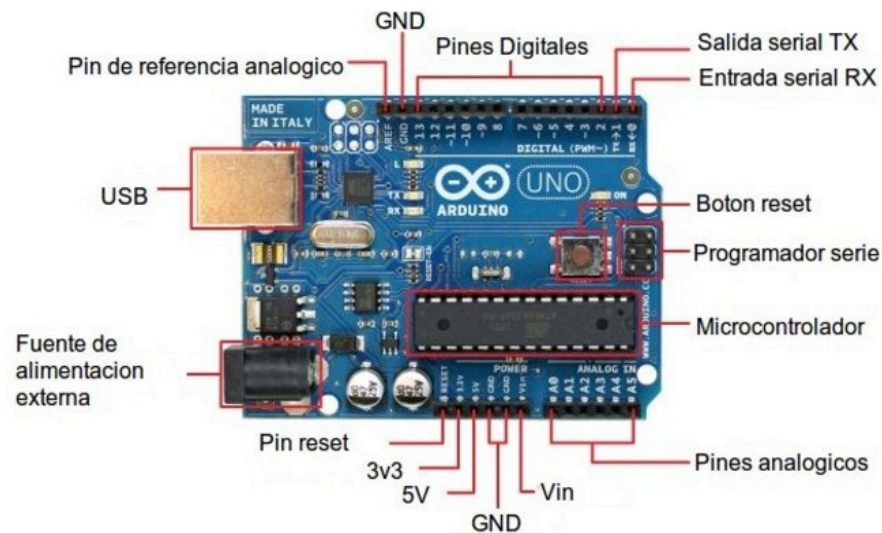


Imagen 11: Visión detallada de microcontrolador Arduino UNO

3.3.6. Sensores de Tensión y Corriente

El control del sistema se puede realizar por un lado teniendo en cuenta la tensión que cae en el motor y por otro lado teniendo en cuenta la corriente que circula por el motor, según el modo seleccionado por el usuario. Para este control es necesario que el sistema sepa en todo momento estos valores tanto de tensión como de corriente, por lo que es necesario diseñar sensores capaces de leer estas señales.

El microcontrolador es capaz de recibir señales analógicas de tensión de entre 0 a 5V, por lo que se tendrán que adaptar las señales leídas a este rango de valores para interpretarlas posteriormente.

Para el control a través de la tensión del motor se tendrá que realizar una conversión desde el rango de 0 a 48V de tensión que puede existir. Como se detallará posteriormente, una opción sencilla es la realización de un divisor de tensión.

Por el contrario, para el control a través de la corriente que circula por el motor, se debe transformar esa señal de corriente en una señal de tensión que se encuentre dentro del rango antes mencionado que es capaz de leer el microcontrolador. Para esta aplicación, lo más común es la utilización de un amplificador de instrumentación que tomando la tensión entre dos puntos de una carga es capaz de leer la corriente que circula por dicha carga. El amplificador de instrumentación usado en estos casos es el AD620. Se debe tener en cuenta que la carga utilizada para leer la corriente no debe afectar al funcionamiento del motor, es decir, la carga resistiva debe ser mucho menor que la del motor.



3.3.7. Control de usuario

Las etapas de control e interacción con el usuario del sistema deben realizarse de forma que facilite la utilización del sistema de control del motor. Para ello se deberán utilizar componentes como potenciómetros, interruptores, pulsadores, LEDs, displays, etc. a través de los cuales el usuario pueda seleccionar los modos de operación, la velocidad del motor deseada, etc.

Estas señales serán procesadas por el microcontrolador a través de las entradas/salidas digitales.



4. DISEÑO HARDWARE

4.1. Esquema eléctrico

Una vez estudiado todos los requisitos y necesidades del sistema, se han diseñado las diferentes etapas como podemos ver en el esquema eléctrico general de la imagen 11. En los puntos posteriores se explicará en detalle el diseño hardware de cada una de las etapas.

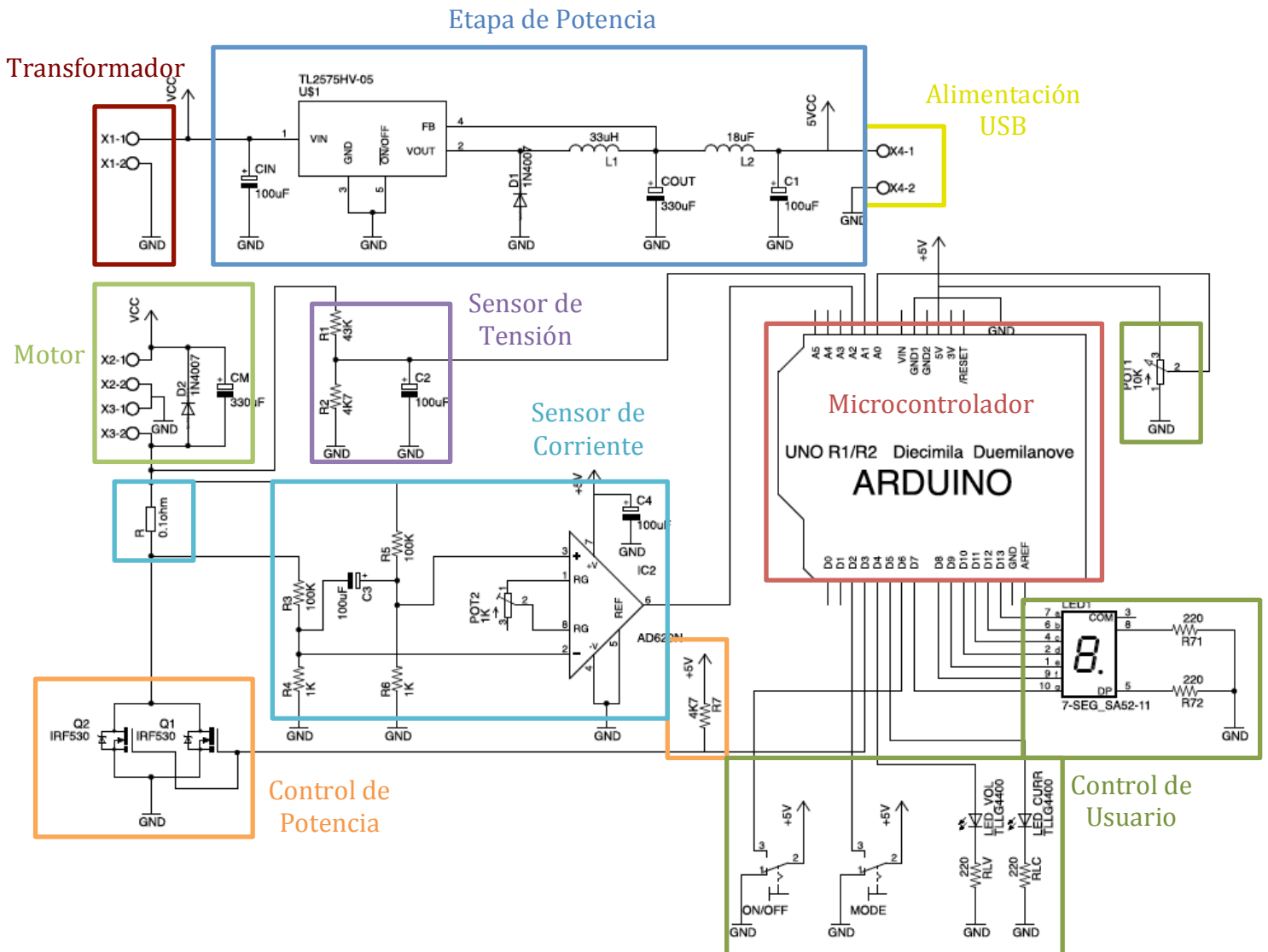


Imagen 12: Explicativo del esquema eléctrico

Para el diseño del esquema eléctrico se ha utilizado el programa de diseño CAD EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor). Este programa de diseño de diagramas electrónicos y PCBs es muy utilizado tanto para proyectos profesionales como no profesionales ya que tiene una licencia Freeware y gran cantidad de bibliotecas de componentes en la red.

4.2. Etapa de potencia

Tal y como se ha explicado anteriormente, el sistema está alimentado por un transformador (X1-1, X1-2) que convierte la señal de la red eléctrica (230V de C.A.) a los 48V de C.C. requeridos por el motor.

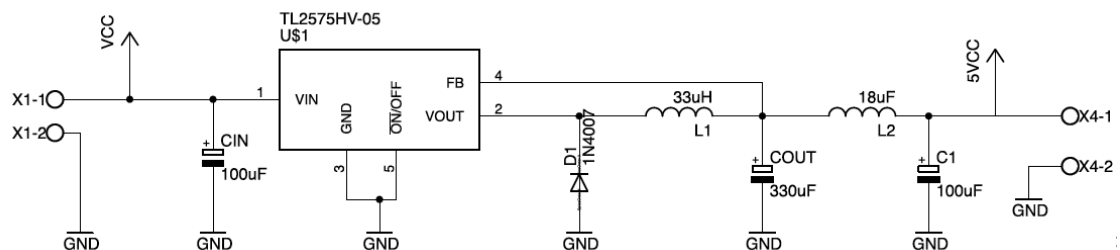


Imagen 13: Esquema eléctrico de la etapa de potencia

Estos 48V (VCC) alimentan directamente al motor y son también la señal de entrada a la etapa de potencia, la cual debe reducir la entrada a una salida de 5V (5VCC) que alimentarán al microcontrolador Arduino.

Ya se ha dicho que el regulador utilizado para esta etapa es el modelo TL2575HV-05, el cual tiene un rango de tensión de entrada de 60V. Este regulador puede ser proporcionado en tres empaquetados diferentes, en este caso se ha elegido el empaquetado tipo KV, que cuenta con 5 pines como se puede observar en la siguiente imagen:

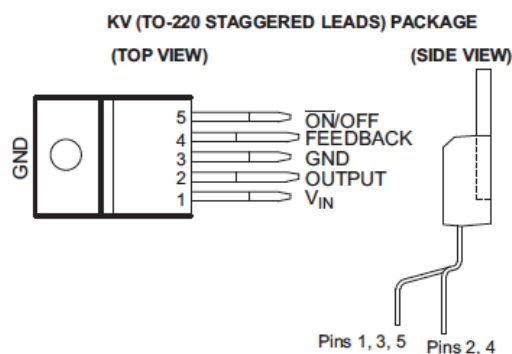


Imagen 14: Esquema descriptivo TL2575HV-05

El diseño eléctrico de esta etapa se ha realizado en función al diseño recomendado que proporciona el fabricante del regulador en la hoja de características. El pin 5 (ON/OFF) se conecta a tierra provocando así que el regulador esté continuamente funcionando, activo a nivel bajo.

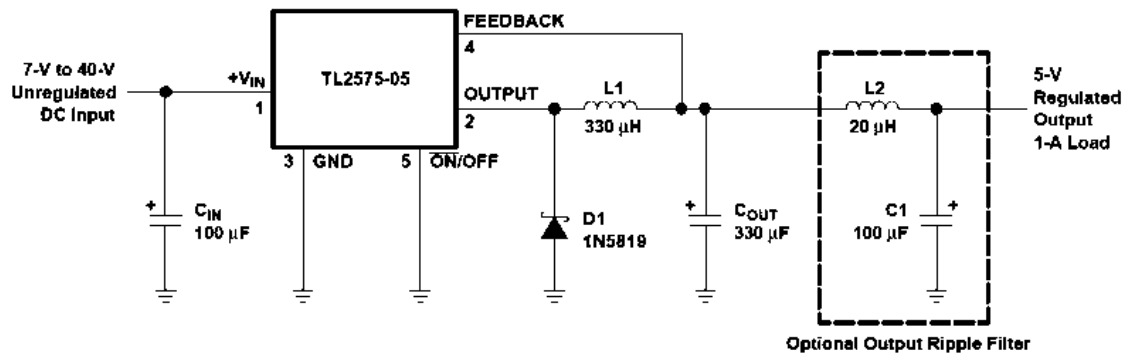


Imagen 15: Esquema eléctrico del regulador de tensión TL2575

El condensador de entrada C_{IN} se utiliza como condensador de acoplo, siendo necesario para obtener una mayor estabilidad en la señal de entrada. Así mismo, se requiere de un condensador en la salida C_{OUT} para estabilizar el bucle y para realizar un primer filtrado del rizado de la señal de salida. El fabricante recomienda el uso de condensadores electrolíticos para estos casos.

También es necesario la instalación de un diodo cerca de la salida D1 que reduzca al mínimo el ruido no deseado de la señal. El fabricante recomienda un diodo de modelo 1N5819 por su alta velocidad de conmutación y bajas caídas de tensión. Sin embargo, en este proyecto se ha utilizado el diodo 1N4007 con características similares e igualmente válido para este caso.

Este regulador trabaja normalmente en modo continuo, por lo que se debe aplicar una bobina o inductor L1 para mejorar el rendimiento del mismo. Para una carga ligera, el inductor se descarga completamente.

Opcionalmente se puede añadir un filtro LC (L2 y C1) que consigue reducir el rizado de la señal de tensión de salida, obteniendo al final de este filtro la señal que se buscaba de 5V de C.C. que alimentará al Arduino a través de un cable USB conectado a los bornes X4-1 y X4-2.

4.3. Motor

El micromotor podológico utilizado se conectará a los bornes X2-1 (alimentación VCC) y X3-2. En paralelo se conecta un diodo de seguridad D2 y un condensador CM que ofrecerá estabilidad al funcionamiento del motor a bajas velocidades, evitando el efecto de los ‘parones’ del motor.

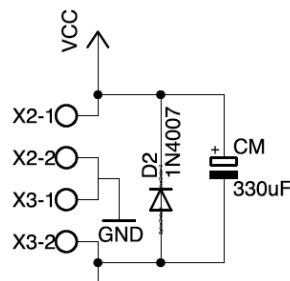


Imagen 16: Esquema eléctrico de condensador-diodo para el motor

Los bornes X2-2 y X3-1 están conectados a tierra para que puedan ser utilizados en la toma de medidas manuales durante las pruebas.

4.4. Control de potencia

Tal y como se ha explicado en el punto sobre la modulación PWM, se ha optado por la utilización de un transistor MOSFET de tipo IRF530 que servirá como conmutado de la tensión aplicada al motor. Se implementarán dos transistores en paralelo, aumentando así su capacidad de circulación de corriente y evitando el fallo del sistema si uno de los dos transistores deja de funcionar.

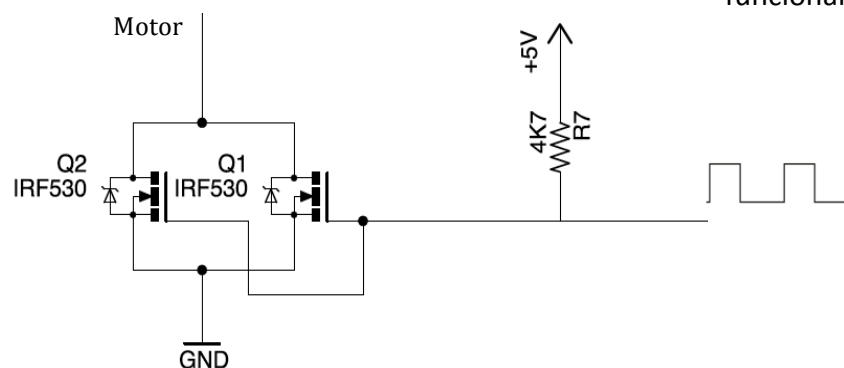


Imagen 17: Esquema eléctrico de la etapa de control de potencia (transistores)

La resistencia R7 se añade para ampliar el valor de la tensión en la puerta del transistor y evitar así que entre en zona óhmica. La señal PWM es proporcionada por uno de los pines digitales del microcontrolador Arduino.

4.5. Sensor de tensión

Para la lectura de la tensión que cae en el motor se debe tener en cuenta el rango de valores leídos en el circuito. En este proyecto se pueden tomar valores de 0 a 48V. Sin embargo, el microprocesador únicamente puede leer valores de tensión entre los 0 y 5V, por lo que se tendrá que diseñar un circuito capaz de adaptar estos dos rangos.

El método más común para ello es un divisor de tensión con la siguiente relación:

$$0V_M \sim 0V_{ADC}$$

$$48V_M \sim 5V_{ADC}$$

$$\text{Factor de División} = \frac{V_{ADC}}{V_M} = \frac{5}{48} = 9,6^{-1}$$

(Ecuación 2)

Siendo V_M la tensión leída en el motor y V_{ADC} la tensión leída por el convertidor analógico – digital del microcontrolador.

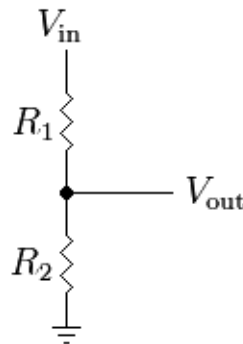


Imagen 18: Divisor de tensión

Para calcular el valor de las resistencias del divisor de tensión se aplica la siguiente ecuación:

$$*V_{in} \Rightarrow V_M \quad V_{out} \Rightarrow V_{ADC}$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$$

(Ecuación 3)

Desarrollando esta fórmula queda la relación de división en relación a las resistencias:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{in} - V_{out}}{V_{out}} = \frac{48 - 5}{5} = 8,6$$

(Ecuación 4)

Para obtener el valor de las resistencias hay que tener en cuenta que la corriente que circula por el divisor de tensión ($R_1 + R_2$) tiene que ser mucho menor a la corriente que circula por el motor, es decir, la resistencia que ofrece el divisor de tensión debe ser mucho mayor a la resistencia que ofrece el circuito a partir del motor ($R_{MOSFET} + R_{Sensor_I}$).

La resistencia máxima del MOSFET, según la hoja de características, es de $0,16\Omega$. La resistencia utilizada para el sensor de corriente, detallado posteriormente, es de $0,1\Omega$. Por tanto, la resistencia del divisor de tensión debe ser mucho mayor de $0,26\Omega$.

Teniendo en cuenta los valores de resistencias que se encuentran en el mercado se han optado por los siguiente valores:

$$R_1 + R_2 \gg 0,26\Omega$$

(Ecuación 5)

$$R_1 = 43K\Omega$$

(Ecuación 6)

$$R_2 = \frac{43K\Omega}{8,6} = 5K\Omega (\approx 4,7K\Omega)$$

(Ecuación 7)

Por tanto, el divisor de tensión diseñado se puede observar en la siguiente imagen:

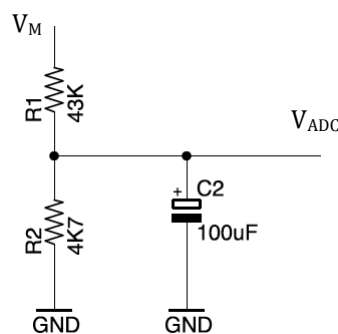


Imagen 19: Esquema eléctrico del sensor de tensión

El condensador C2 se utiliza como condensador de desacoplo para estabilizar la señal de entrada al microcontrolador.

Como se puede observar en el esquema eléctrico general, el divisor de tensión se ha conectado a la salida del motor. Es decir, que realmente no está leyendo la caída de tensión en el motor, si no que se puede calcular restando el valor de leído a la tensión de alimentación del motor de 48V.

Esto será muy importante a la hora del diseño software, puesto que cuando el motor esté funcionando a plena potencia, la caída de tensión en el motor será máxima y por tanto, la tensión leída por el divisor de tensión mínima, y viceversa.

4.6. Sensor de corriente

En el caso del sensor de la corriente que circula por el motor se debe realizar una conversión de la corriente leída por el sensor al rango de tensión que es capaz de leer el convertidor analógico – digital del microcontrolador.

Para ello, se utilizará el amplificador de instrumentación AD620, que obtiene una señal de salida de tensión a partir de dos señales de tensión tomadas entre dos puntos de la línea donde se quiere medir la corriente circulante. Para ello es necesario la instalación de una carga de muy baja resistividad (R) de forma que no afecte al funcionamiento del motor. Para este caso se ha optado por una resistencia de 0,1Ω. Por tanto, la corriente que circula por el circuito se calcula de a cuerdo a la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V_A - V_B}{R}$$

(Ecuación 8)

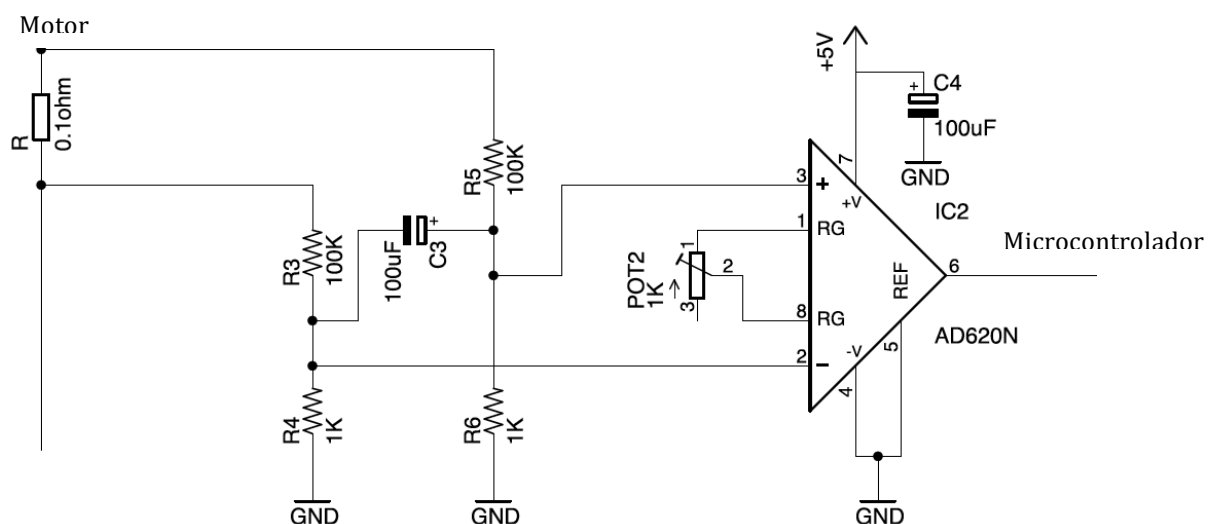


Imagen 20: Esquema eléctrico del sensor de corriente

Teniendo en cuenta que la intensidad de la corriente que circula por el motor debe ser mayor que la intensidad que circula por el sensor de corriente, se han implementado dos divisores de tensión idénticos, uno a cada una de las entradas del amplificador de instrumentación.

Se ha optado por un factor de división de 100^{-1} , por tanto, desarrollando la ecuación 3 con este factor se obtienen unas resistencias de:

$$R_3 = R_5 = 100K\Omega$$

(Ecuación 9)

$$R_4 = R_6 = 1K\Omega$$

(Ecuación 10)

De esta forma se puede calcular el rango de la diferencia de tensión en la carga resistiva R del sensor ($V_A - V_B$), sabiendo que la corriente máxima que circula por el motor es 4,79A (ver Ecuación 1).

$$|V_A - V_B|_{max} = 4,79A \cdot 0,1\Omega = 0,479V \approx 0,5V$$

(Ecuación 11)

Esta diferencia de tensión máxima llega a la entrada del amplificador operacional a través de los divisores de tensión:

$$|V_+ - V_-|_{max} = 0,5V \cdot 0,01 = 5mV$$

(Ecuación 12)

El amplificador de instrumentación AD620 está compuesto por:

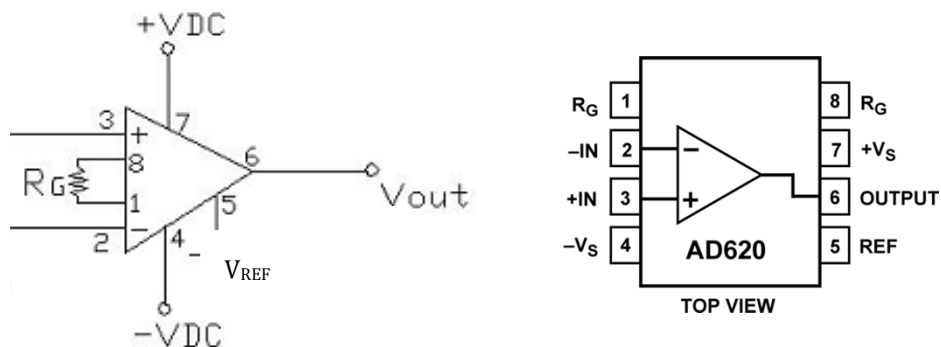


Imagen 21: Esquema explicativo del amplificador de instrumentación AD620

- Dos señales de entrada V_+ y V_- , que son las que se van a comparar.
- Pines de alimentación ($\pm VDC$) de entre $\pm 2,3V$ y $\pm 18V$. En este caso está alimentado entre 5 y 0V.
- Tensión de referencia V_{REF} .

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

- Resistencia de ganancia R_G , con la que se regulará el valor de la Ganancia (G) del amplificador.
- Tensión de salida del amplificador V_{OUT} , debe estar dentro del rango de tensión que es capaz de leer el microcontrolador (0 ~ 5 V).

El funcionamiento del amplificador viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_{OUT} = G \cdot (V_+ - V_-) + V_{REF}$$

(Ecuación 13)

Para obtener la ganancia que se debe diseñar para el caso de este proyecto se plantean las dos ecuaciones con los casos extremos, es decir, con los valores mínimos y máximos de los componentes que se conocen:

$$0V = G \cdot 0 + V_{REF}$$

(Ecuación 14)

$$5V = G \cdot 5mV + V_{REF}$$

(Ecuación 15)

De la ecuación 14 se obtiene el valor de la tensión de referencia:

$$V_{REF} = 0V$$

(Ecuación 16)

Con este valor conocido, se puede calcular la ganancia requerida para este sistema:

$$G = \frac{5V}{5 \cdot 10^{-3}V} = 1000 V/V$$

(Ecuación 17)

El valor de la ganancia viene dado por la siguiente ecuación, de la cual se puede obtener el valor requerido de la resistencia de ganancia:

$$G = 1 + \frac{49,4K\Omega}{R_G}$$

(Ecuación 18)

$$R_G = \frac{49,4K\Omega}{G - 1} = \frac{49,4K\Omega}{1000 - 1} = 49,4\Omega \approx 50\Omega$$

(Ecuación 19)

Una vez calculada la resistencia que ajusta la ganancia del amplificador de instrumentación ya están todos los componentes del sensor de corriente diseñados.

En este proyecto se ha optado por la utilización de un potenciómetro de 1K Ω como la resistencia de la ganancia, de modo que se pueda regular manualmente la ganancia del amplificador de instrumentación. Por ejemplo, puede ser útil si la intensidad de corriente que circula por el motor es mayor, y por tanto, la ganancia del amplificador debe ser menor. El valor de la ganancia es inversamente proporcional al valor de la resistencia de ganancia.

4.7. Control de usuario

Como se ha comentado anteriormente, esta etapa de control se encargará de recibir las órdenes del usuario y de mostrarle el funcionamiento del sistema.

Tal y como se describe en la funcionalidad del sistema, el usuario podrá seleccionar entre tres modos de funcionamiento: apagado, modo tensión y modo corriente.

Para esta selección se utilizarán dos interruptores que están conectados a dos entradas digitales del microcontrolador:

- ON/OFF: este interruptor se encarga de encender o apagar el sistema, es decir, el motor estará apagado y no atenderá a la señal de velocidad seleccionada.
- MODE: este interruptor se encarga de seleccionar el modo de control del motor, mediante tensión o mediante corriente.

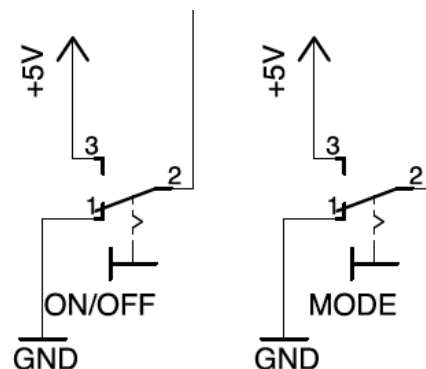


Imagen 22: Interruptores de la etapa de control de usuario

En una posición, el interruptor alimentará la entrada digital a 5V, mientras que en la otra posición, la conectará con la tierra.

Otro elemento de control de usuario es la selección de la velocidad deseada del motor. Para la selección de esta velocidad se ha seleccionado un potenciómetro de 10K Ω alimentado a 5V y conectado a un convertidor analógico-digital del microcontrolador.

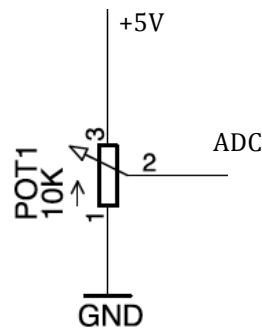


Imagen 23: Potenciómetro de la etapa de control de usuario

De esta forma, cuando la resistencia del potenciómetro entre los nodos 2 y 3 es mínima, la entrada analógica del microcontrolador recibirá 5V; por otro lado, cuando la resistencia entre los nodos 2 y 3 es máxima, la tensión de entrada al microcontrolador será nula.

Gracias al software, posteriormente descrito, esta señal podrá convertirse en diferentes velocidades para el motor. Para este proyecto se ha decidido que se podrán seleccionar hasta seis velocidades diferentes desde 0 (motor apagado) hasta 5 (motor a máxima velocidad).

Otros elementos en esta etapa del sistema son los indicadores visuales que tienen como objetivo el informar al usuario del funcionamiento actual del motor. Para ello, se ha propuesto la implementación de dos LEDs que informan del modo de control del motor.

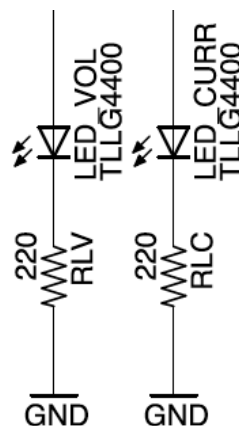


Imagen 24: LEDs de la etapa de control de usuario

Existen tres estados para estos dos LEDs:

LED VOL	LED CURR	ESTADO
OFF	OFF	Apagado
OFF	ON	Modo de Control por Corriente
ON	OFF	Modo de Control por Tensión

Tabla 20: Valores de los LEDs para los estados de funcionamiento

Por último, se ha propuesto la utilización de un display de siete segmentos para mostrar la velocidad seleccionada por el usuario mediante el potenciómetro. Cada uno de los segmentos está conectado a una salida digital del microcontrolador.

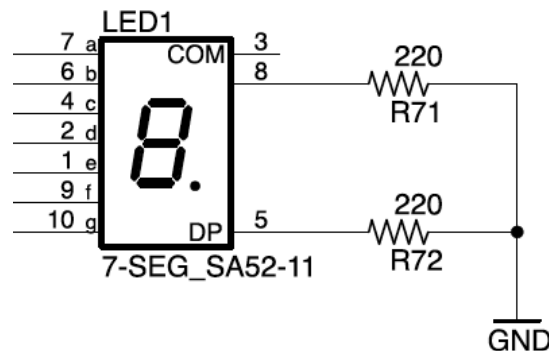


Imagen 25: Esquema eléctrico del Display 7 segmentos

El pin 3 del display se deja al aire puesto que pertenece al segmento del punto y no se va a utilizar en este proyecto. Al ser un display tipo ánodo común, las salidas 5 y 8 se conectan a la tierra. Cuando el microcontrolador envía una señal activa (1 lógico = 5V), el segmento correspondiente se encenderá.

Se mostrarán los números del 0 al 5 dependiendo de la velocidad seleccionada. Cuando se haya seleccionado el modo apagado, se encenderá la barra central del display, y cuando se produzca un error se encenderán todos los segmentos.

4.8. Microcontrolador Arduino

Como se ha estado viendo a lo largo de este punto, el sistema y cada una de las etapas interactúa continuamente con el microcontrolador enviando y recibiendo señales a través de sus entradas analógicas (convertidores analógicos-digitales) y sus entradas/salidas digitales.

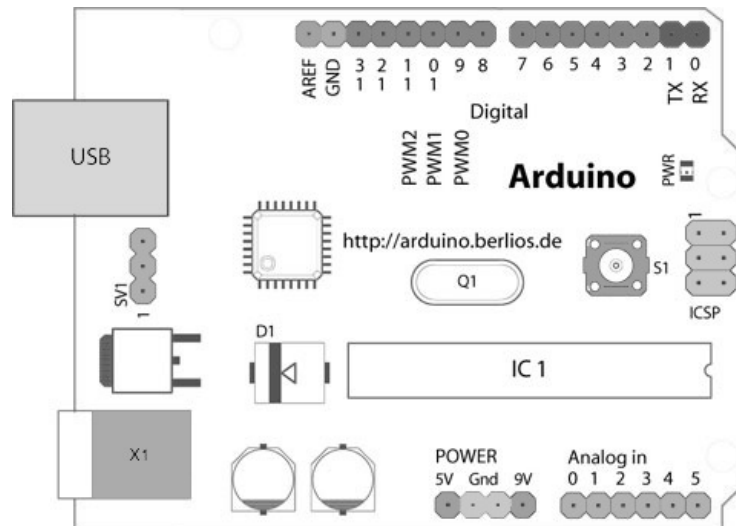


Imagen 26: Visión esquemática de Arduino UNO

El Arduino está alimentado a través del conector USB. El cable USB se conectará a los 5V de salida de la etapa de potencia, en los bornes X4-1 y X4-2.

En la siguiente tabla se presentan los pines del microcontrolador Arduino utilizados en este proyecto:

TIPO		NOMBRE	FUNCIÓN
Entradas Analógicas ADC		A0	Lee valor del potenciómetro de velocidad
		A1	Lee valor del sensor de tensión
		A2	Lee el valor del sensor de corriente
Digitales	Entradas	D2	Lee posición del interruptor MODE
		D6	Lee posición del interruptor ON/OFF
	Salidas	D4	LED indicador modo Tensión
		D5	LED indicador modo Corriente
		D7	Segmento 10 del display 7S
		D8	Segmento 9 del display 7S
		D9	Segmento 1 del display 7S
		D10	Segmento 2 del display 7S
		D11	Segmento 4 del display 7S
		D12	Segmento 6 del display 7S
		D13	Segmento 7 del display 7S
		PWM	D3
	Comunicación	D0	No conectada externamente
		D1	No conectada externamente
Alimentación		+5V	Pin de señal de alimentación de 5V
		GND1	Pin de tierra

Tabla 21: Relación de pines utilizados del microcontrolador Arduino



Los pines digitales de comunicación D0 y D1 están conectados internamente en la placa Arduino y se utilizan como canales de comunicación puerto – serie, por ejemplo en la grabación del código software. Pueden ser utilizados también como entradas/salidas digitales corrientes, aunque se aconseja evitar su uso si durante la ejecución del programa se va a realizar paralelamente una comunicación puerto – serie, ya que puede general algunos problemas.



5. DISEÑO SOFTWARE

5.1. Diagramas de flujo

El software es el encargado del control de potencia del micromotor. Este control lo hace a partir de las señales que recibe el microcontrolador de los distintos sensores y mandos de control de usuario. Una vez procesadas estas señales envía una señal PWM que regula la velocidad del motor.

A continuación se representan los diagramas de flujo del software implementado. En la tabla siguiente se detallan las características principales de los diagramas de flujo para una mejor comprensión de los mismos.





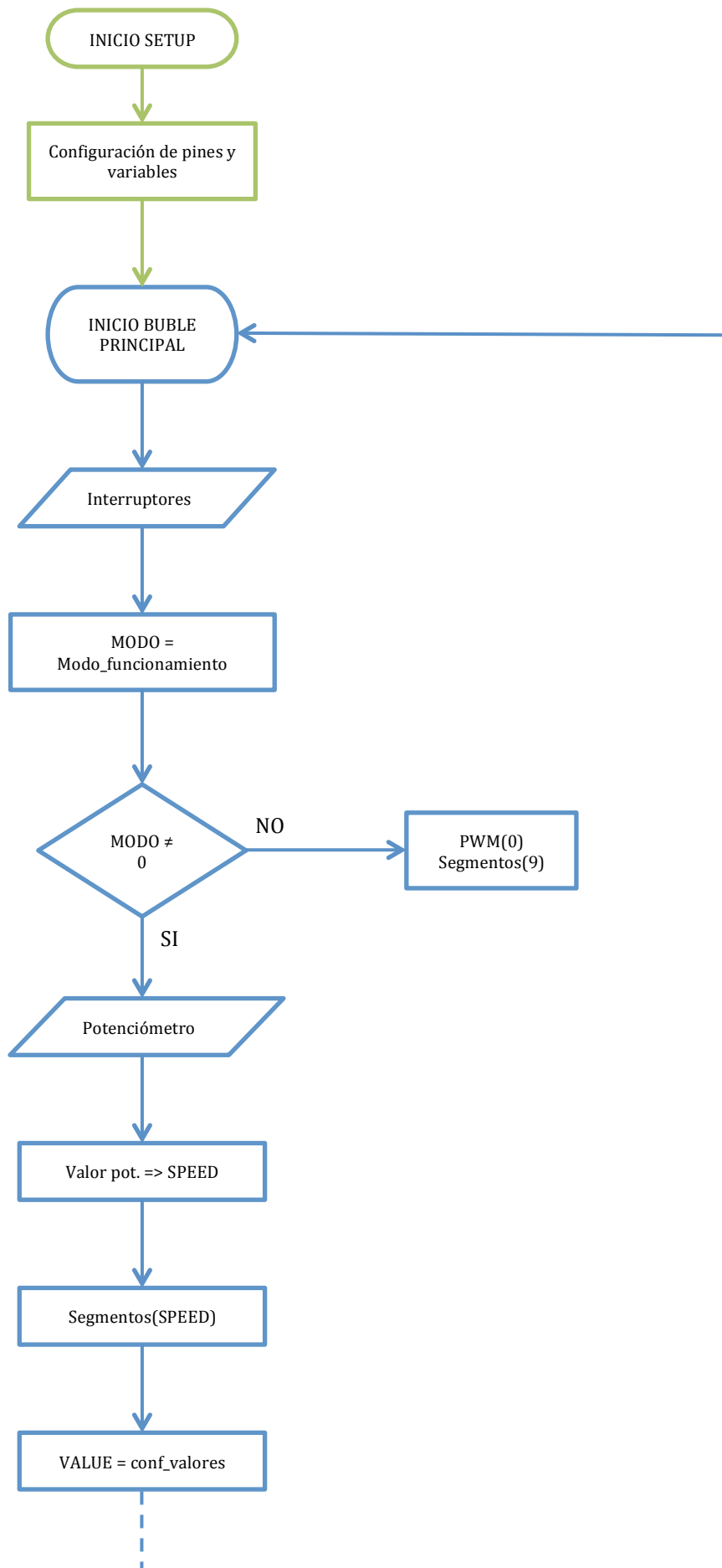
Color	Significado
	Bucle principal
	Bucle de configuración
	Bucle de comunicación puerto-serie (sólo para pruebas)
	Bucles de funciones

Tabla 22: Guía de colores para diagramas de flujo



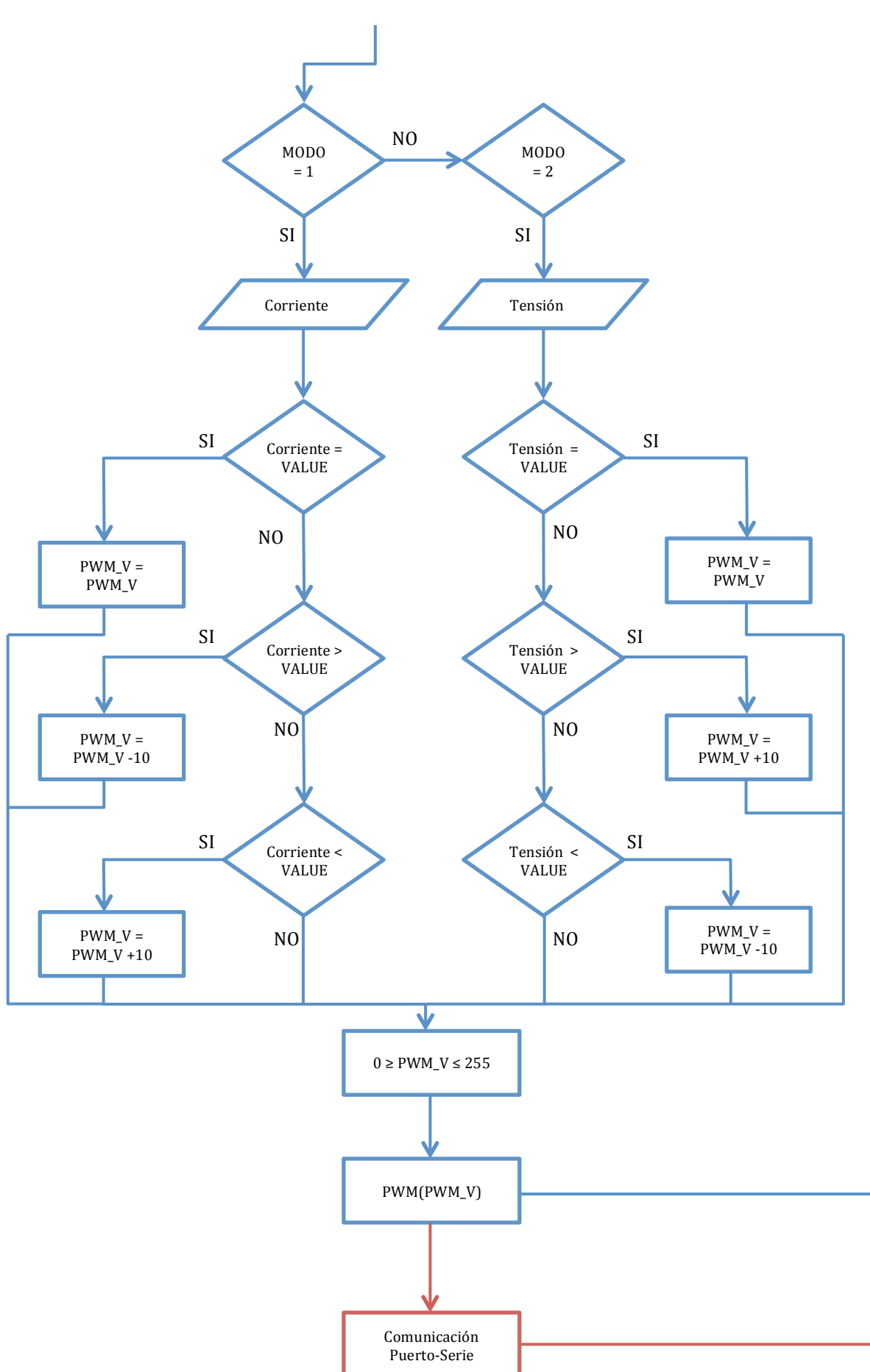


Diagrama 1: Programa principal

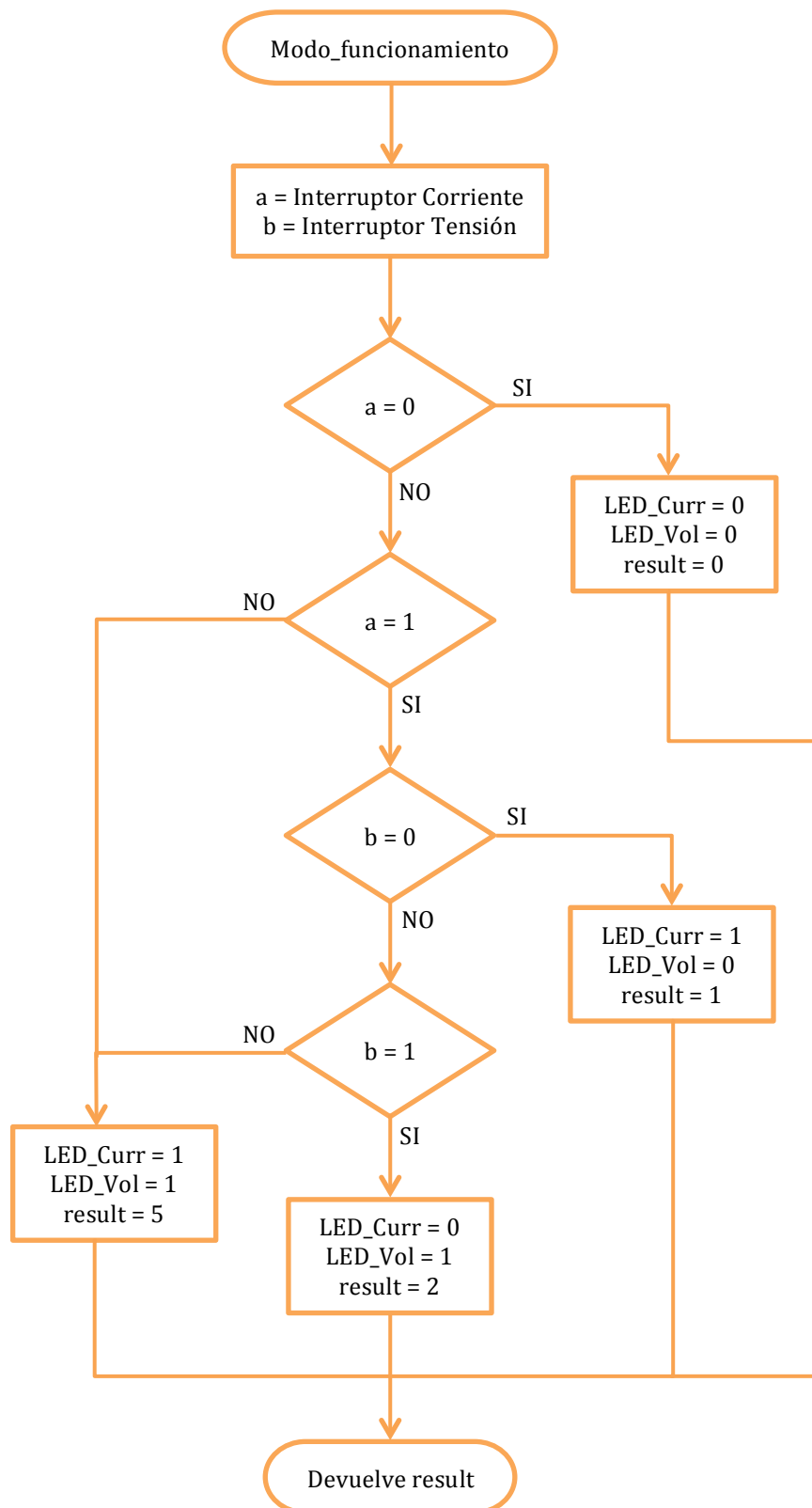


Diagrama 2: Modo de funcionamiento

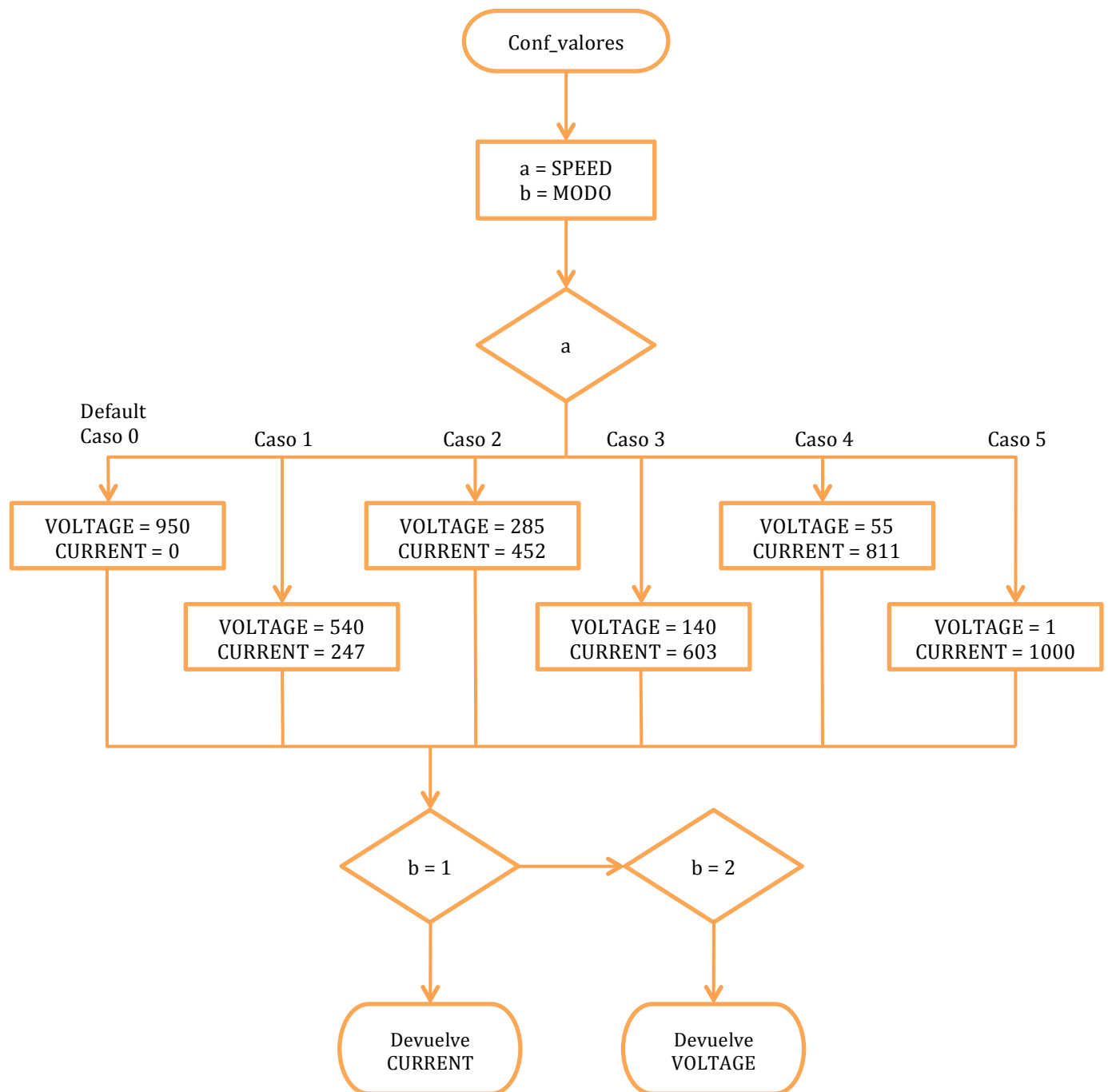
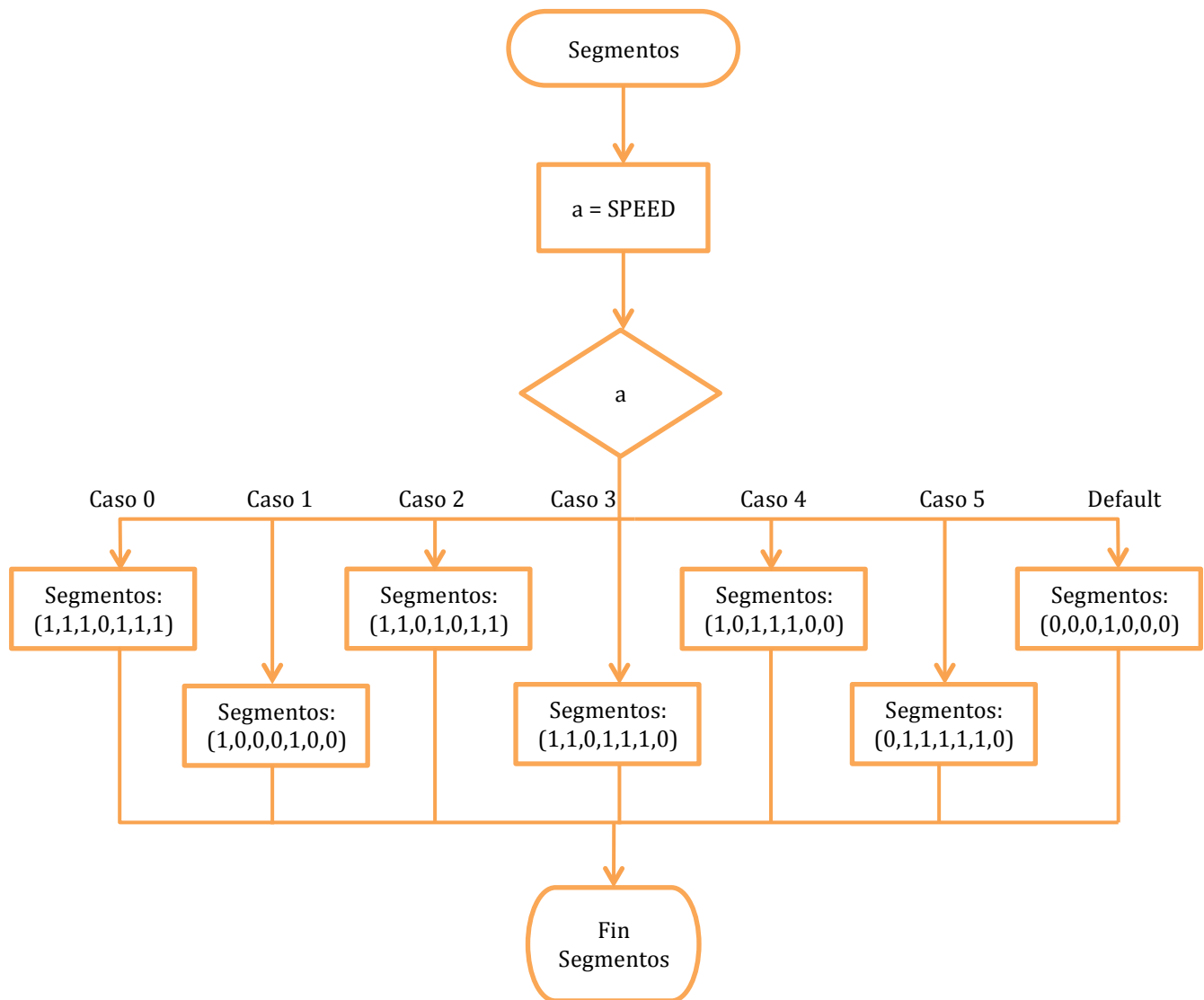


Diagrama 3: Configuración de valores



5.2. Funcionalidad del Software

5.2.1. Entorno de desarrollo

El desarrollo del software se ha realizado desde el propio soporte del microcontrolador que proporciona Arduino. Este programa es de versión libre, por lo que puede descargarse e instalarse en cualquier equipo. Además está disponible para los sistemas operativos Windows, Linux y Macintosh.

Este entorno permite desarrollar software de una forma muy sencilla y simplificada. Utiliza un lenguaje propio basado en el lenguaje de programación de alto nivel Processing, muy similar a C++.

Desde este entorno, el software puede ser compilado y descargado en el propio microcontrolador. Además permite la opción de realizar una comunicación puerto-serie entre el microcontrolador y el equipo. La conexión entre el microcontrolador y el terminal se realiza por USB.

5.2.2. Variables y constantes utilizadas

Para el desarrollo del software encargado del control del micromotor se han utilizado distintas variables y constantes globales con el objetivo de simplificar el software y mejorar la visualización y comprensión del mismo. En la siguiente tabla se pueden observar todas las variables y constantes utilizadas.

Nombre	Valor	Función
Constantes Globales		
numleds	7	Número de LEDs utilizados (0-7)
potPin	A0	Pin de entrada analógica del potenciómetro
VPin	A1	Pin de entrada analógica del sensor de tensión
Cpin	A2	Pin de entrada analógica del sensor de corriente
IVol	6	Pin de entrada digital del interruptor ON/OFF
ICur	2	Pin de entrada digital del interruptor MODE
ledVol	4	Pin de salida digital del LED de tensión
ledCur	5	Pin de salida digital del LED de corriente
PWM	3	Pin de salida de la señal PWM
ledPins[]	7-13	Array de pines de salida de LEDs de 7 segmentos
Variables		
Ivoltage	H-L	Valor leído por el interruptor ON/OFF
ICurrent	H-L	Valor leído por el interruptor MODE
MODE	0-5	Modo de funcionamiento de control
potRead	0-1023	Valor leído por la entrada analógica del potenciómetro.

VolRead	0-1023	Valor leído por la entrada analógica del sensor de Tensión
CurRead	0-1023	Valor leído por la entrada analógica del sensor de Corriente
SPEED	0-5	Velocidad del motor elegida
VALUE	0-1023	Valor que se quiere alcanzar de Tensión o Corriente
VOLTAGE	0-1023	Valor predefinido de Tensión para velocidad x
CURRENT	0-1023	Valor predefinido de Corriente para velocidad x
PWM_value	0-255	Ciclo de trabajo de señal PWM (0%-100%)
TIEMPO	0 -	Variable utilizada para comunicaciones
SPEED_100	0-500	Variable utilizada para comunicaciones
V_MEDIDO	0-1023	Variable utilizada para comunicaciones

Tabla 23: Variables y constantes utilizadas

5.2.3. Rutina de Configuración

Una vez que se han declarado todas las constantes globales y las variables a utilizar en el programa, se desarrolla la rutina de configuración³ (void setup()). Esta rutina se ejecutará una única vez al comenzar el programa, o cuando se realiza un 'reset' del mismo.

En esta rutina se configuran los pines digitales como salidas (OUTPUTS), por ejemplo para los LEDs; o como entradas (INPUTS), por ejemplo para los interruptores. También se definen los valores de inicio de las variables que lo requieran. En este caso se aconseja definir un valor de 0% a la señal PWM para que de esta forma asegurar que el motor comenzará parado.

Ejemplo:

```
pinMode(IVol, INPUT);
```

En este caso se configura el pin IVol (6) como entrada. Este es el pin del interruptor ON/OFF.

5.2.4. Rutina Principal

Este bucle se ejecuta después de la rutina de configuración. Permanecerá ejecutándose continuamente hasta que el microcontrolador deja de ser alimentado o si se realiza un 'reset' al mismo.

³ El código completo del programa software se añade en el Anexo IV

Para comenzar lee el valor de los dos interruptores de control (IVoltage, ICurrent). Los pines de entrada pueden leer entre nivel bajo (0 lógico) o nivel alto (1 lógico) dependiendo de la tensión que le llegue (0-5V). A continuación se llama a la función *modo_funcionamiento* enviando estos dos valores de los interruptores. La función devolverá un valor entre 0 y 5 que será el modo de control.

Si el modo es 0 (apagado), se enviará por el pin de PWM un ciclo de trabajo del 0% para mantener el motor apagado. Además se llamará a la función *segmentos* para encender las luces correspondientes al estado de apagado.

Si el modo es distinto de 0, se lee el valor del potenciómetro que indica la velocidad elegida por el usuario. Este valor puede estar entre 0 y 1023 por lo que se realiza una conversión a un rango de 6 velocidades (SPEED) de entre 0 y 5 de la siguiente forma:

```
SPEED = map(potRead, 0, 1023, 0, 5);
```

Esta velocidad se envía a la función *segmentos* para encender las luces correspondientes a la velocidad seleccionada por el usuario. También se envía el valor de la velocidad junto con el modo de control a la función *conf_valores* de forma que devuelva a la variable VALUE el valor de tensión o de corriente que se desea alcanzar.

A continuación se distingue el modo de funcionamiento seleccionado. Para ambos modos se realiza el mismo bucle pero con pequeñas variaciones. Primero se lee el valor del sensor de tensión o corriente (según corresponda), a través de las entradas analógicas que convierten el valor de entre 0 y 5V a valores digitales de entre 0 y 1023.

Si el valor real medido es igual al valor definido que se quiere alcanzar para esa velocidad (VALUE), la variable PWM_value se mantiene igual. Si no son iguales se modifica esta variable PWM_value dependiendo de los modos de control tal y como se define a continuación:

- Modo 1 (Control por corriente). En este modo cuanto mayor tensión (corriente leída por el amplificador) lea el sensor, mayor corriente estará circulando por el motor y funcionará a más velocidad. Es, por tanto, directamente proporcional.
 - Si valor real > VALUE: se resta 10 puntos a PWM_value.
 - Si valor real < VALUE: se suma 10 puntos a PWM_value.

- Modo 2 (Control por tensión). En este modo cuanto menos tensión lea el sensor, mayor tensión estará cayendo en el motor y funcionará a más velocidad. Es, por tanto, inversamente proporcional.
 - Si valor real > VALUE: se suma 10 puntos a PWM_value.
 - Si valor real < VALUE: se resta 10 puntos a PWM_value.

Se ha diseñado de tal forma que el valor del ciclo de trabajo de la señal PWM varia de 10 en 10, de forma que pueda variar para alcanzar el valor deseado más rápidamente sin que se produzca una oscilación muy elevada. Si se utilizase unos aumentos o disminuciones unitarias sería un sistema mucho más estable (menos oscilaciones), pero más lento. Este valor se puede adaptar a las necesidades de cada proyecto. En la siguiente gráfica podemos observar el funcionamiento del sistema para distintos valores.

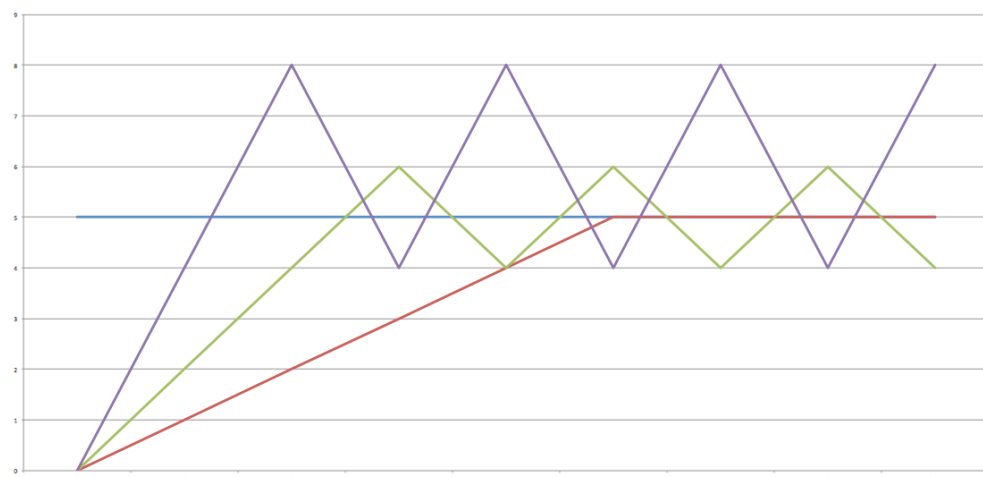


Imagen 27: Comportamiento del sistema para distintos valores de variación PWM

Así, la línea roja representa un sistema que varia unitariamente el valor de la señal y es muy estable pues al llegar al valor deseado (línea azul) se mantiene en la misma, sin embargo, es el sistema más lento. Por otro lado la línea morada es el sistema más rápido pero presenta mucha variación respecto del valor real y el valor deseado. La línea verde representa un sistema medio con una variación pequeña y siendo más rápido que el sistema unitario.

Una vez que se ha definido el valor de la señal PWM_value se comprueba que este valor permanece en el rango de 0 a 255, pues son los únicos valores que puede dar el pin de salida PWM. Si se sale de este rango se aplican los valores extremos más próximos.

Por último, este valor se envía por el pin PWM (3) de forma que cuando se tiene un 0, la tensión emitida por ese pin es 0V y cuando se tiene 255 se envían 5V que saturarán el transistor MOSFET y el motor estará a máxima velocidad.

Una vez completado el bucle principal vuelve al comienzo del mismo para realizar continuamente el mismo proceso.

5.2.5. Funciones

Desde el bucle principal se llama a varias funciones que realizan partes concretas del sistema de control implementado. Estas funciones pueden ser ejecutadas una o varias veces en un mismo bucle, por lo que su uso simplifica considerablemente el sistema software general.

5.2.5.1. `modo_funcionamiento(int a, int b)`

En esta función, la variable 'a' es el valor leído por el interruptor ON/OFF; mientras que la variable 'b' es el valor leído por el interruptor MODE.

Esta función define, por tanto, el estado o modo de control del sistema de acuerdo a las dos variables mencionadas y devuelve a la rutina principal el valor de dicho modo de funcionamiento. Además se encarga de encender o apagar los dos LEDs de control.

- a = 0: Modo de funcionamiento apagado (0). Apaga los dos LEDs.
- a = 1:
 - b = 0: Modo de control por corriente (1). Enciende LED de corriente, apaga LED de tensión.
 - b = 1: Modo de control por tensión (2). Enciende LED de tensión, apaga LED de corriente.
- Otra situación (default): Estado de error (5), enciende los dos LEDs.

5.2.5.2. **conf_valores (int a, int b)**

En este caso, la variable 'a' es la velocidad escogida por el usuario (SPEED) y la variable 'b' es el modo de funcionamiento. El objetivo de esta función es definir el valor (VALUE) leído por los sensores de tensión y de corriente que se desea alcanzar.

Para cada una de las velocidades seleccionadas en cada modo se define un valor. La selección de este valor se realiza después de una serie de pruebas del motor a diferentes velocidades en las que se han leído los valores de los sensores. Estos valores pueden ser modificados atendiendo a las necesidades del proyecto, por ejemplo por un cambio del motor utilizado.

En esta función se utilizan las variables VOLTAGE y CURRENT para guardar el valor deseado a una velocidad para los dos modos de funcionamiento. Una vez que se han definido estos valores, se comprueba el modo de funcionamiento y se devuelve a la rutina principal uno u otro valor.

5.2.5.3. **segmentos (int a)**

Esta función se encarga de mostrar a través de un display de 7 segmentos la velocidad seleccionada por el usuario, variable 'a'. Dependiendo de la velocidad se encienden unos u otros segmentos (asociados a salidas digitales), de acuerdo al siguiente esquema:

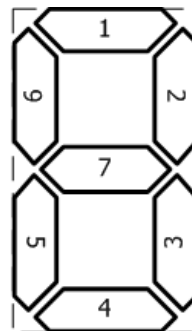


Imagen 28: Numeración de segmentos del display

Segmento	Pin Digital
1	8
2	7
3	11
4	2
5	13
6	9
7	10

Tabla 24: Pines asignados a los segmentos del display

Así por ejemplo, para una velocidad de 3 se encenderán los segmentos 1,2,3,4,7 (pines digitales activos: 8,7,11,2,10).

Para el modo de funcionamiento apagado (0) se encenderá el segmento central 7.

5.2.6. Comunicación Puerto-Serie

Como se ha comentado anteriormente, para la realización de pruebas, configuración y monitorización del sistema se ha diseñado uno módulos software complementarios para realizar una comunicación puerto-serie entre el microcontrolador y el ordenador.

Tanto en el puerto serie como en la rutina de configuración debe definirse la velocidad de comunicación, que normalmente es de 9600bps (baudios por segundo), con la siguiente instrucción:

```
Serial.begin(9600);
```

Al final de la rutina principal, una vez enviada la señal PWM de control, se ha diseñado un módulo para enviar todas las variables presentes en el sistema. Para un uso correcto y eficiente del programa se recomienda no enviar todas las variables a la vez, si no solo enviar las que se necesiten comprobar o leer. Estas modificaciones se pueden realizar añadiendo la doble barra de comentario `//` delante de las instrucciones que no se desean realizar.

También se han creado varias variables como TIEMPO y SPEED_100 para mejora la lectura de las variables y poder realizar gráficas legibles con los datos obtenidos. Posteriormente se detallará un ejemplo de la utilización de estos datos.

Para que el sistema pueda ejecutar estas comunicaciones correctamente se debe añadir una instrucción de retraso o `'delay'` que haga esperar al sistema unos milisegundos antes de volver a repetir el bucle principal. En este caso se ha utilizado un retraso de 500ms.



6. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

6.1. Diseño circuito eléctrico

Como se ha descrito anteriormente, el primer paso para comenzar la construcción de este proyecto es el diseño del circuito eléctrico. Una vez diseñado teóricamente sobre el papel, se ha utilizado el programa EAGLE para diseñar todos los componentes.

Este programa dispone de una librería muy amplia de los componentes más utilizados en el mercado. Sin embargo, algunos de ellos utilizados en este proyecto no se han encontrado en la librería común. Ciertos componentes, como el Arduino, se pueden encontrar librerías en internet. En el caso del microcontrolador, la propia web de la marca permite descargar estas librerías para importarlas en el programa. Para los componentes que no se pueden encontrar en internet, existe la opción de crearlos en el propio programa. En el caso de los condensadores utilizados se ha optado por la creación a partir de una plantilla de otro condensador existente en la librería para modificar la distancia entre los pines. Se debe crear en estos casos tanto la imagen esquemática para el circuito como la imagen real utilizada en el diseño de la placa PCB.

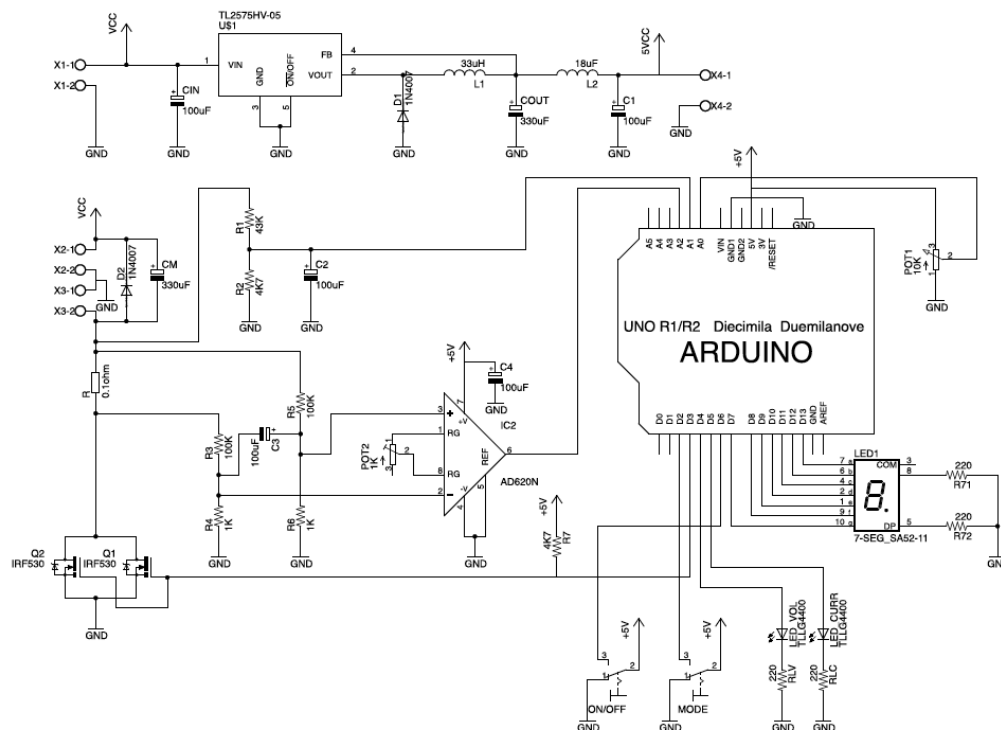


Imagen 29: Esquema eléctrico general

6.2. Diseño PCB

Una vez que se ha realizado el diseño del circuito eléctrico, mostrado y explicado anteriormente, y el diseño del código software del control del microcontrolador Arduino, se ha procedido a la fabricación del circuito eléctrico.

El circuito se fabricará sobre una placa PCB o Placa de Circuito Impreso. En esta placa se dibujarán las pistas que unen los diferentes componentes, anclados a través de soldadura pasante. Para ello, se ha utilizado el programa EAGLE, al igual que se utilizó para el diseño del circuito. Este programa permite exportar el esquema eléctrico a un esquema de PCB.

Para comenzar el diseño PCB debe definirse el perímetro de la placa. En este caso, al poseer únicamente una licencia de pruebas este perímetro está restringido a una dimensiones específicas de 175x105mm. Dentro de este perímetro se deben situar todos los componentes del circuito eléctrico diseñado sin que quede ninguna parte del mismo fuera del perímetro.

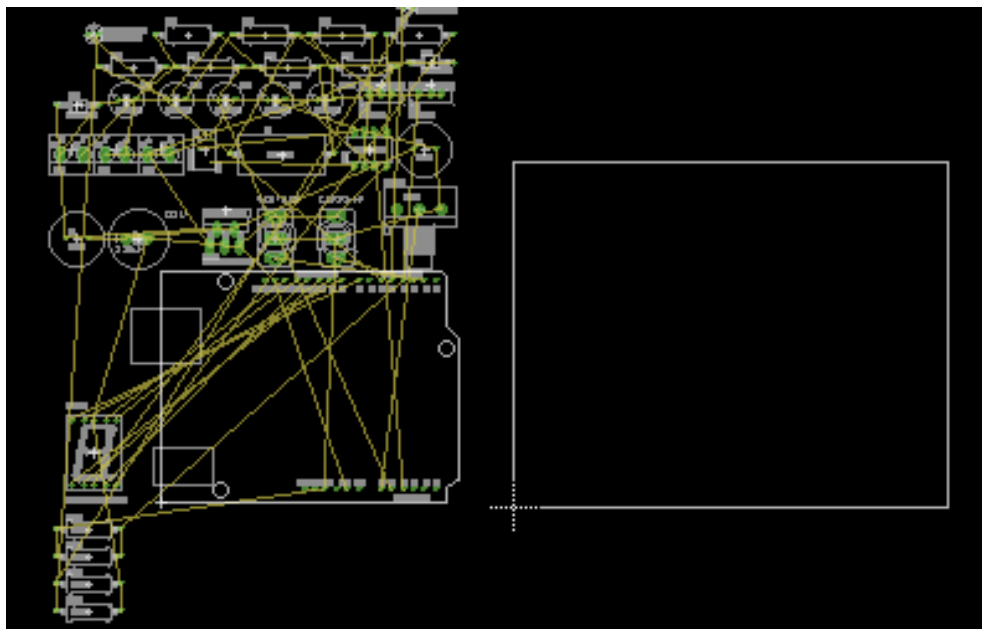


Imagen 30: Visión primaria del diseño PCB

Es importante tener en cuenta que los componentes deben colocarse de forma ordenada y lógica de acuerdo a sus conexiones para facilitar y hacer posible el ruteado automático. Así, los componentes conectados entre sí deberían situarse lo más próximos posibles. También es aconsejable situar las entradas y salidas del sistema en los extremos del perímetro para poder acceder a ellos de forma sencilla.

Una vez que se han situado manualmente todos los componentes, el programa EAGLE permite la opción de rutear automáticamente todas las pistas del circuito. Con el objetivo de facilitar la fabricación de la placa PCB se ha creado una capa común de tierra (Bottom) en la que se conectan todos los puntos del circuito puestos a tierra o masa. El resto de pistas está separado por unas vías libres de cobre.

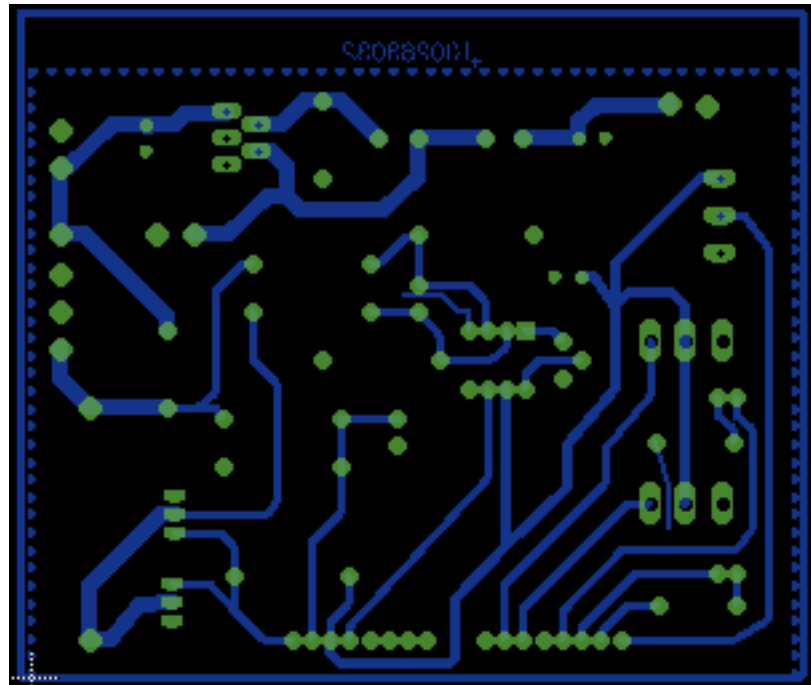


Imagen 31: Rutas y PADs del circuito impreso PCB parte 1

Tras el ruteado automático, el usuario es capaz de modificar las pistas, tanto de posición como de características, como el grosor. Por ejemplo, para las pistas de la etapa de potencia se ha optado por aumentar el ancho, puesto que deben soportar tensiones mayores que por las pistas de señales digitales. Así mismo, se pueden modificar las conexiones o PADs, cambiándoles de forma (redonda, ovalada, cuadrada), de grosor, el tamaño para efectuar el taladro pasante, etc.

Como requisitos generales para el diseño de un circuito PCB se han tenido en cuenta:

- No deben cruzarse dos pistas.
- Evitar los codos de 90º en las pistas.
- Evitar pistas muy largas entre dos puntos de conexión.

- Evitar pistas circulares que puedan crear corrientes no deseadas.
- No pueden entrar en contacto dos PADs.

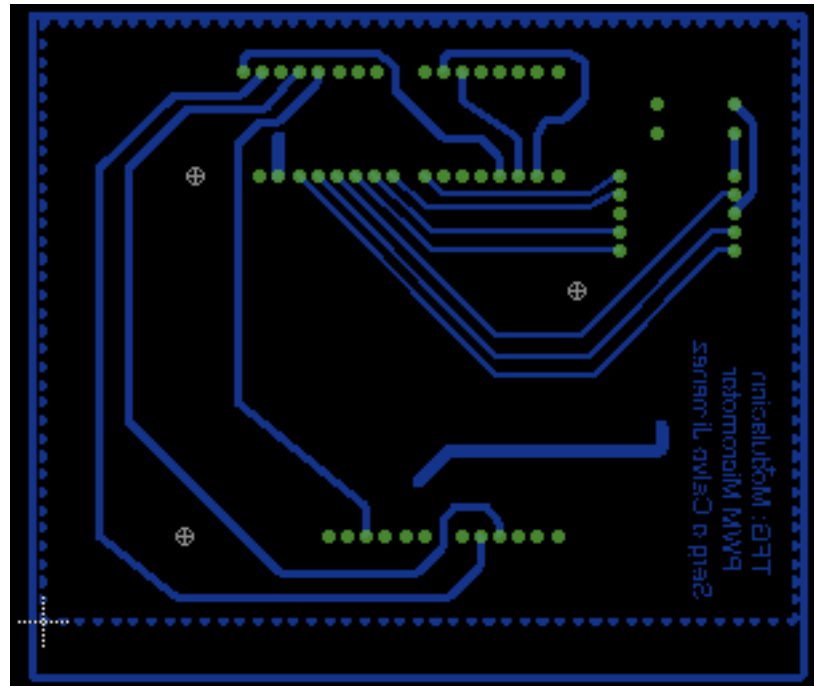


Imagen 32: Rutas y PADs del circuito impreso PCB parte 2

La colocación de los componentes de la placa PCB puede resultar muy costosa dependiendo del número de componentes a utilizar y el espacio disponible, aunque se recomienda ser eficientes para abaratar costes. En el caso de este proyecto se han realizado varios diseños hasta encontrar el más óptimo.

Por último, una vez terminado el diseño PCB se comprueba que el ruteado se ha completado al 100%, es decir, que no ha quedado ninguna conexión sin completar. Si se ha completado, se puede descargar la imagen del circuito en modo fotolito, en blanco y negro. Esta imagen servirá para realizar la fabricación de la placa, siendo la parte en negro la que quedará el cobre (material conductor) y la parte en blanco sin cobre (material aislante).

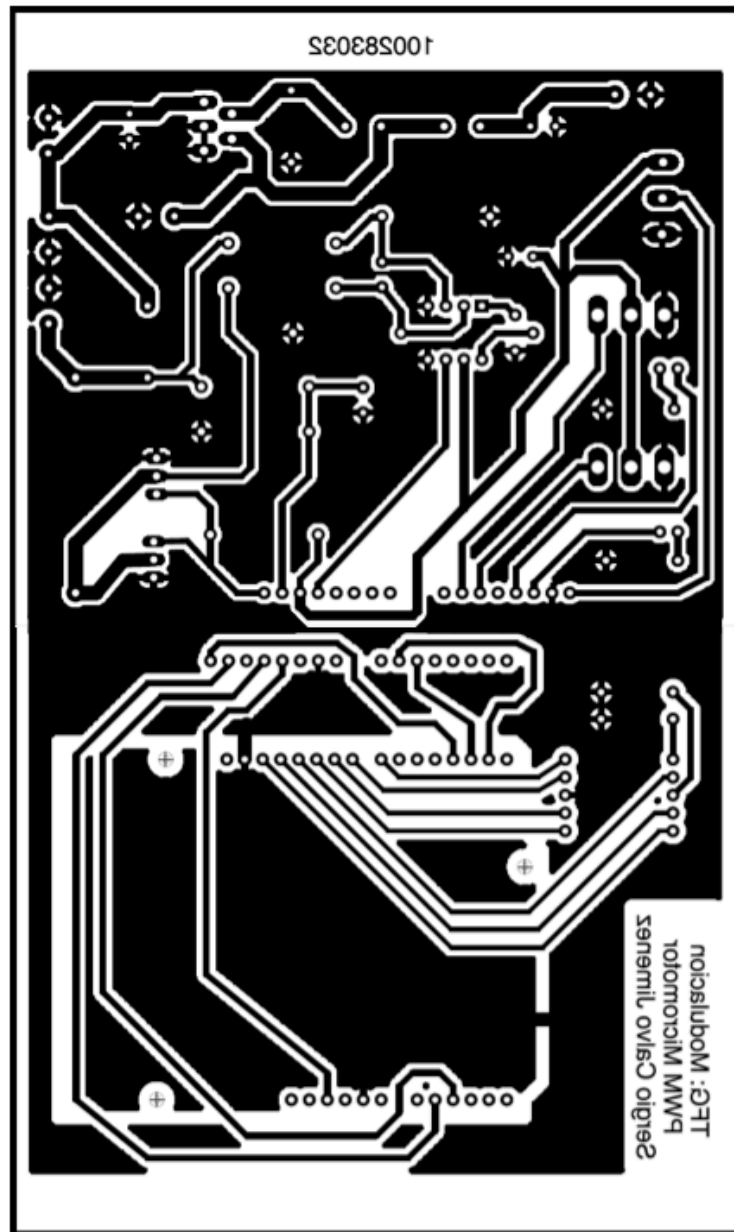


Imagen 33: Fotolito

Esta imagen debe imprimirse en un papel especial (papel cebolla) que se entregará al laboratorio de la universidad, encargada de la fabricación de la placa PCB.

6.3. Montaje del proyecto

Una vez que el laboratorio de la universidad proporciona la placa PCB impresa, se puede comenzar con el montaje del proyecto.

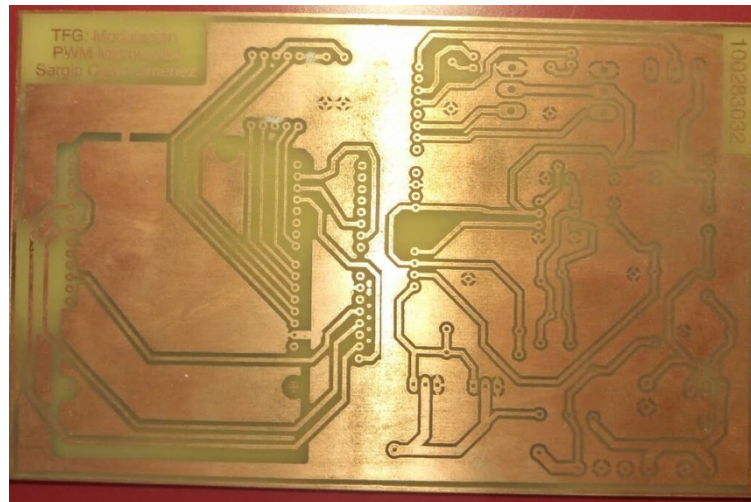


Imagen 34: Placa PCB impresa

Lo primero que se necesita realizar es una prueba de continuidad de la placa, para comprobar que se ha impreso correctamente y están todas las pistas conectadas como se han diseñado. A continuación, se deben taladrar los puntos pasantes de anclaje de los componentes. Para ello debe seleccionarse las brocas de diámetro adecuado para cada uno de los componentes, que no son iguales en todos los casos.

Después de haber taladrado todos los puntos necesarios para la colocación de los componentes se deben soldar los mismos. En este caso, al ser una placa PCB con soldadura pasante, este trabajo es muy sencillo. Simplemente debe colocarse el componente con sus pines atravesando la placa y soldar estos pines a la placa por la parte de la pista de cobre impresa. Es importante extremar la precaución en los puntos donde estén situados numerosos pines muy cerca unos de otros para que la soldadura no haga conexión con otro pin.

Por último, tras haber colocado y soldado todos los componentes del circuito, se debe repetir la prueba de continuidad del circuito para comprobar que todas las soldaduras se han realizado correctamente, que estén conectadas únicamente al punto deseado y que no se ha realizado ningún cortocircuito.

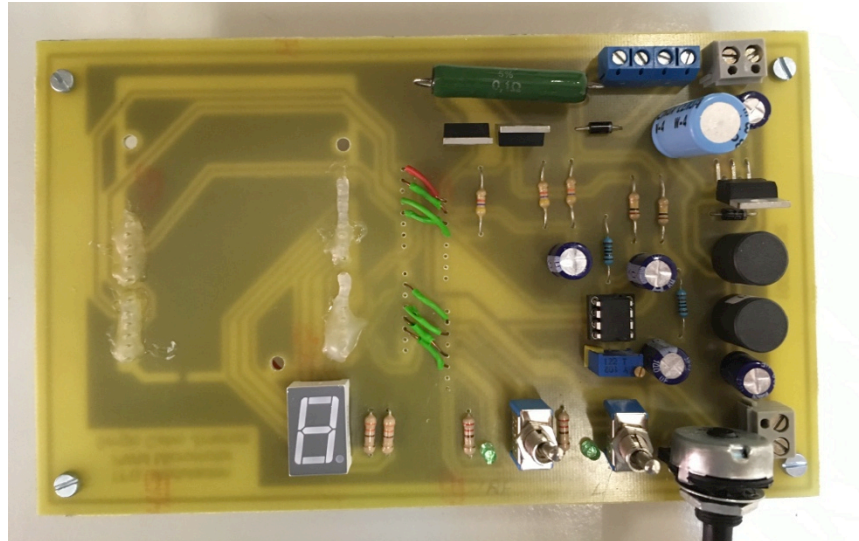


Imagen 35: Componentes instalados en placa PCB

6.4. Ensayos y medidas

Tras el montaje del circuito completo sobre la placa PCB se procede a la realización de las pruebas de funcionamiento del sistema. Para ello, se han realizado de forma modular, es decir, se ha comenzado probando los distintos módulos del circuito para al final acabar probando todo el sistema completo.

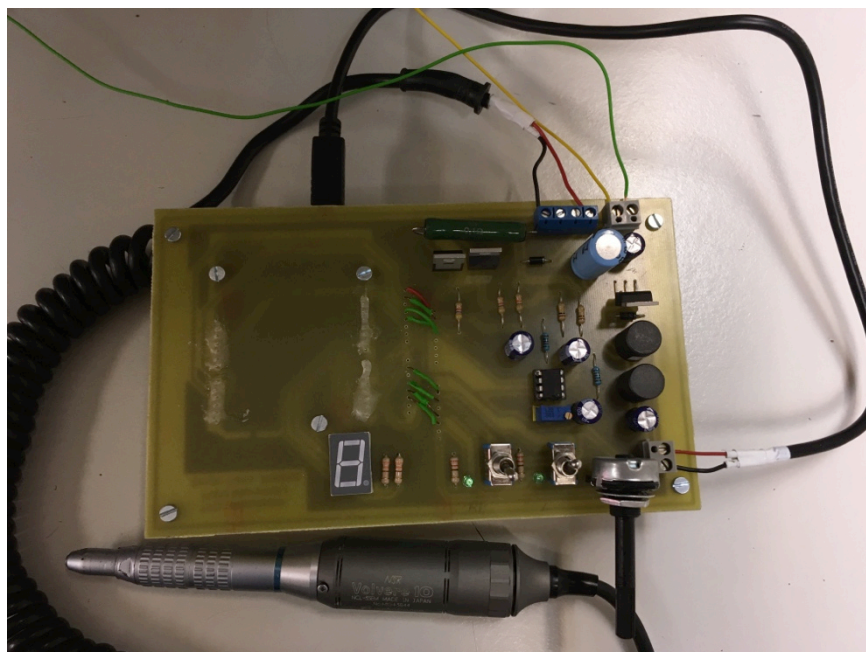


Imagen 36: Vista general del sistema implementado

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

Las primeras pruebas se han realizado sobre la etapa de potencia. Conectando la fuente de alimentación a la entrada de alimentación del sistema, se ha comprobado que a la salida de la etapa de potencia se obtenían los 5V requeridos que alimentarán al microcontrolador y a la etapa de control.

Funcionando correctamente la etapa de potencia y estando, por tanto, el microcontrolador Arduino correctamente alimentado se realizaron las pruebas de funcionamiento del microcontrolador. Para estas pruebas se han creado diferentes módulos de software sencillos que han permitido realizar las pruebas necesarias para cada etapa o parte del sistema. También se ha utilizado la comunicación puerto-serie para comprobar en tiempo real el estado del sistema y sus diferentes variables.

Primero se ha comprobado la etapa de control de usuario, es decir, la lectura correcta del potenciómetro y su conversión a 6 valores de velocidad, las entradas digitales de los interruptores ON/OFF y MODE, y los pines de salida para los LEDs de estado y el display de siete segmentos correspondiente a la velocidad seleccionada.

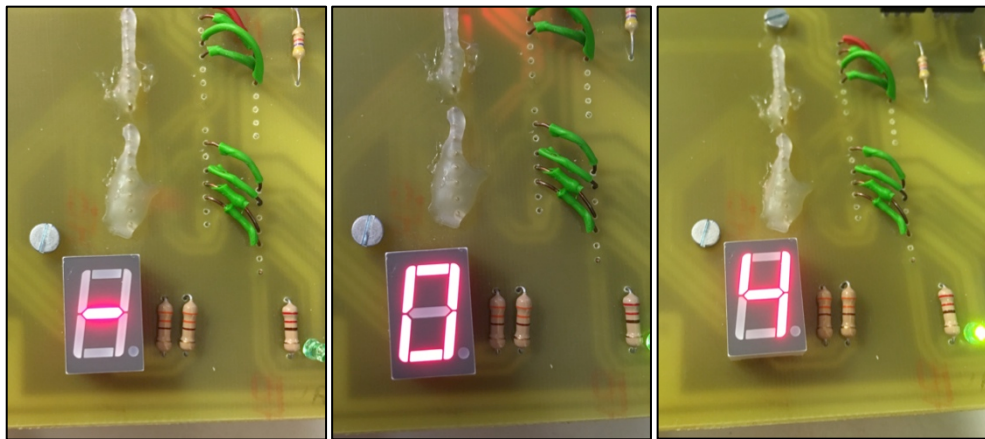


Imagen 37: Display en diferentes estados y valores de velocidad del sistema

A continuación se ha probado la salida de la señal PWM para distintos valores entre 0 y 100%, para lo que se ha utilizado un osciloscopio conectado a la salida correspondiente (PD3) que muestra cómo varía la señal PWM dependiendo del ciclo de trabajo impuesto por el microcontrolador. Así mismo, se ha comprobado si la etapa de control de potencia formado por los transistores MOSFET funciona como conmutador dejando pasar la tensión o no del motor. Para estas primeras pruebas se ha evitado la utilización del motor, que se ha sustituido por una carga resistiva variable con el objetivo de evitar daños en el motor durante las pruebas.

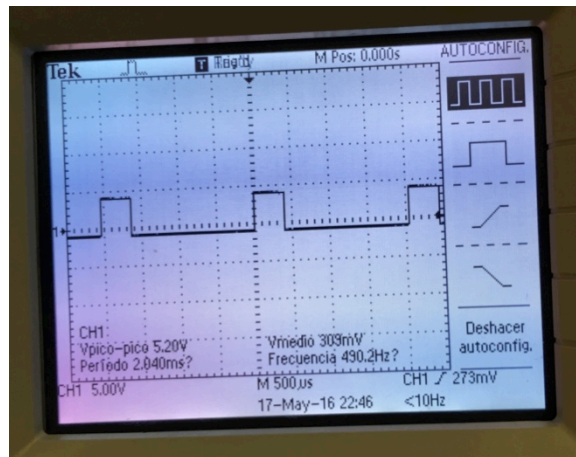


Imagen 38: Señal PWM con ciclo de trabajo del 20%

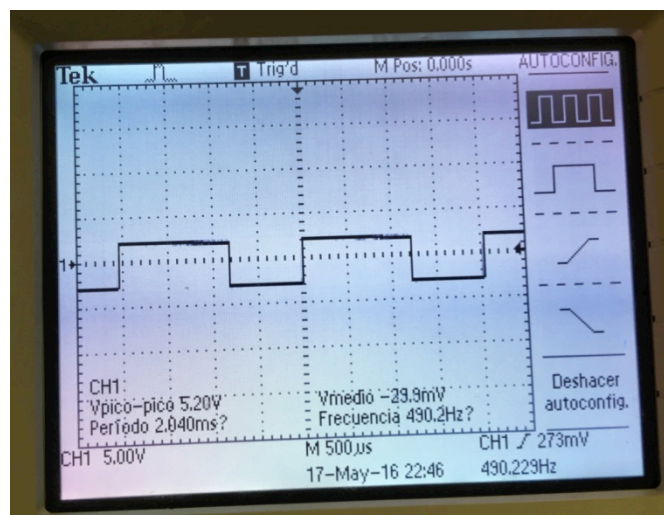


Imagen 39: Señal PWM con ciclo de trabajo del 60%

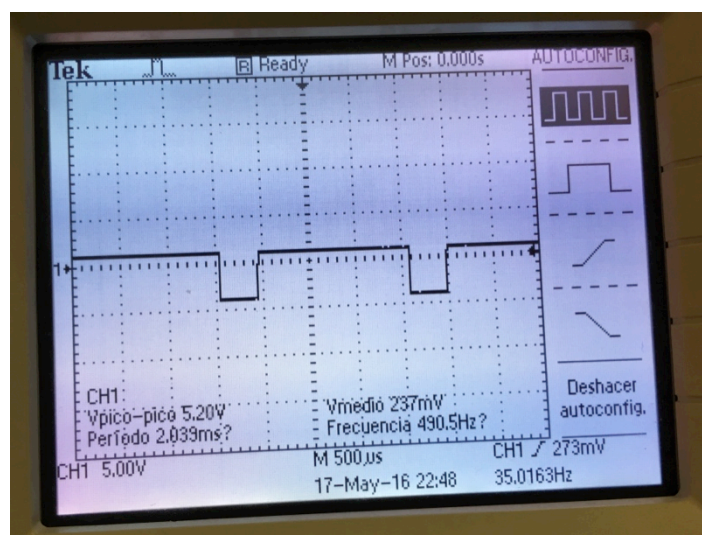


Imagen 40: Señal PWM con ciclo de trabajo del 80%

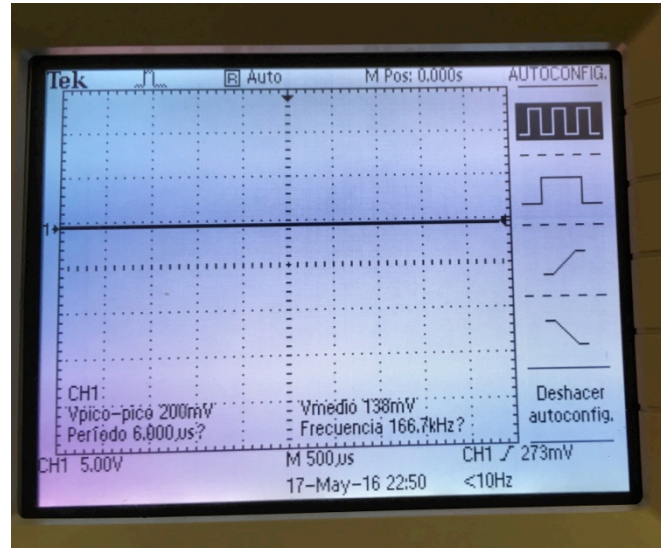


Imagen 41: Señal PWM con ciclo de trabajo del 100%

Utilizando esta carga resistiva también se han realizado las pruebas de funcionamiento de los sensores de tensión y corriente. Para estos casos se ha medido físicamente los valores de tensión y corriente que circulaban por la etapa del motor y se ha comprobado si las señales de los sensores que llegan al microcontrolador corresponden con las calculadas teóricamente.

Estando testadas todas las etapas del sistema por separado, se comprueba el funcionamiento del motor, aplicándole diferentes velocidades de forma directa con el microcontrolador.

Una vez que se ha asegurado el funcionamiento correcto del motor, se efectúan las pruebas del sistema completo. Primeramente se comprueba que el sistema responde a la variación de la velocidad y aplica diferentes ciclos de trabajo a la señal PWM para modular el motor en diferentes velocidades. También se prueba que responde correctamente a los modos de funcionamiento, parando el motor y respondiendo a las señales de los sensores de tensión o de corriente según corresponda.

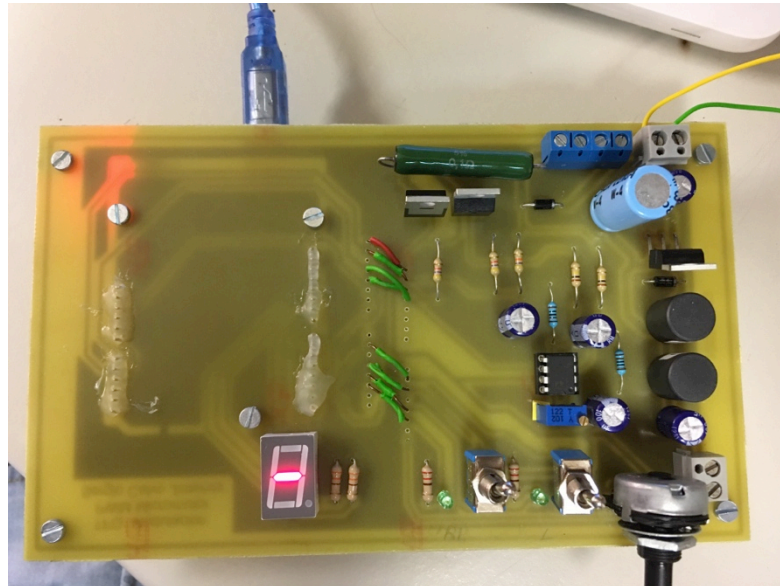


Imagen 42: Vista aérea del circuito en estado OFF

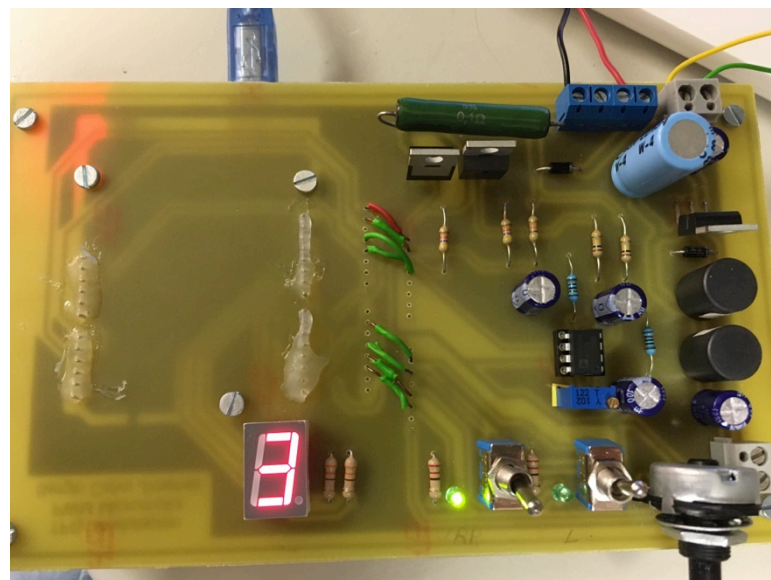


Imagen 43: Vista aérea del circuito en estado ON y velocidad 3

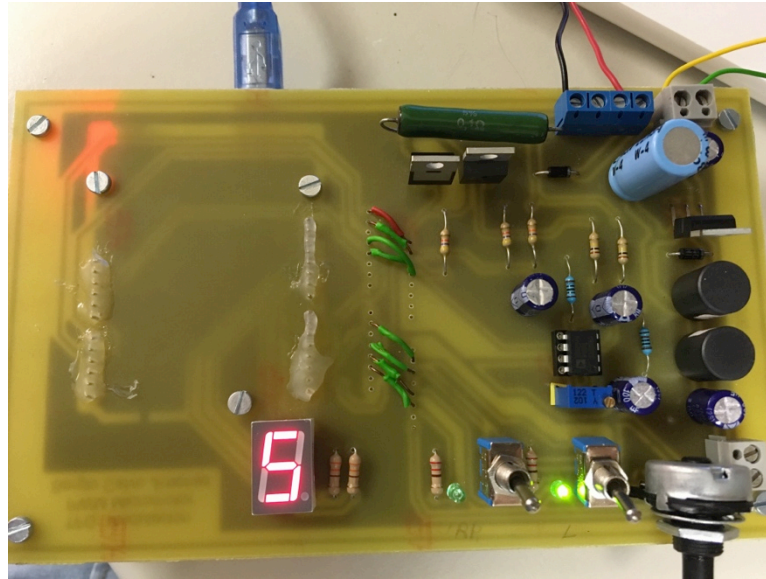


Imagen 44: Vista aérea del circuito en estado ON y velocidad 5

Primero se han ajustado los valores de tensión y corriente que se requerían para cada una de las 6 velocidades del motor existente. Para ello se ha aplicado un ciclo de trabajo específico a la señal PWM y se han tomado las medidas de los sensores. Estos valores serán a los que se pretende llegar cuando se selecciona la velocidad y que el microcontrolador buscará variando el ciclo de trabajo. Estos valores se pueden observar en la siguiente tabla:

Velocidad	Valor Tensión	Valor Corriente
0	950	0
1	540	247
2	285	452
3	140	603
4	55	811
5	1	1000

Tabla 25: Valores ajustados de tensión y corriente para las velocidades seleccionadas leídos por el microcontrolador

Durante las pruebas se han realizado diferentes modificaciones en el código software debido a errores de programación o de funcionamiento.

Como se ha comentado anteriormente, durante la realización de las pruebas se ha añadido un módulo software para mantener una comunicación puerto-serie entre el sistema y el usuario de forma que se han podido almacenar los datos de las distintas variables. Esto provoca una ralentización en la respuesta del microcontrolador, pero permite al usuario conocer el funcionamiento real del sistema y detectar los posibles errores del mismo.

En este caso el usuario, modificando el software, es capaz de almacenar los datos que le interesan para cada caso. Para graficar los datos y obtener de forma visual el comportamiento del sistema se han utilizado los siguientes datos: tiempo (como referencia temporal), modo de funcionamiento, velocidad seleccionada, señal PWM, valor del sensor buscado y valor del sensor real. Para ello, se han mostrado los valores de estos datos en la ventana de comunicaciones serie don un formato CSV (valores separados por punto y coma) para poder copiar los resultados y poder exportarlos fácilmente a un Excel para realizar las gráficas. Con estos datos se han obtenido las siguientes gráficas:

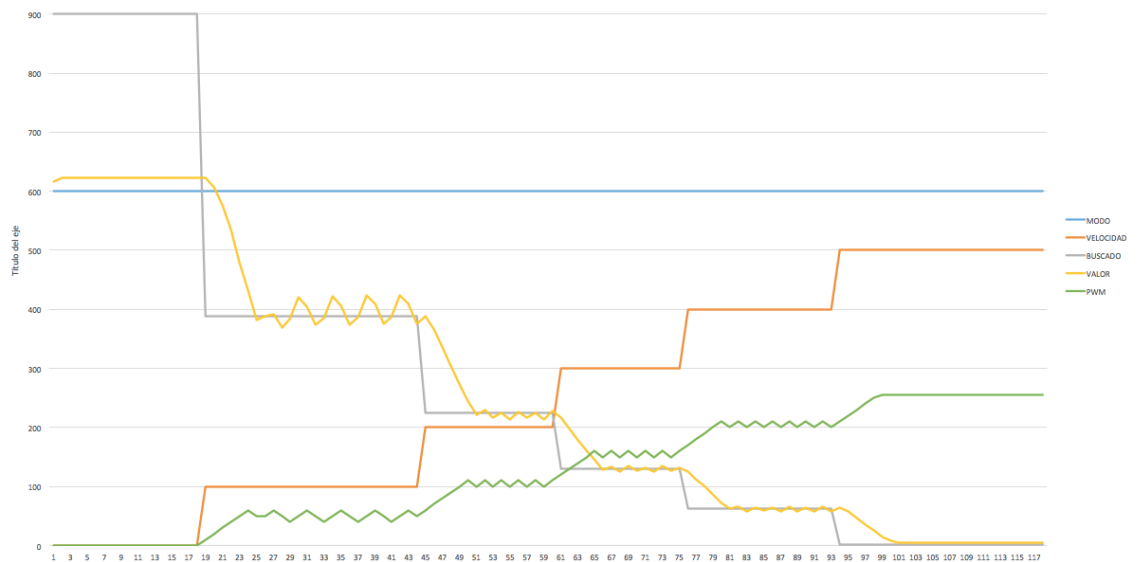


Imagen 45: Gráfica de resultados en pruebas en modo voltaje

En esta gráfica se puede observar el modo de funcionamiento (gráfica azul), en este caso está funcionando en modo de lectura de voltaje. La señal de modo de funcionamiento se ha multiplicado por 300 para poder visualizarla correctamente junto con el resto de señales. Se puede observar también como varía la velocidad seleccionada por el usuario (gráfica roja) a través del mando de control alcanzando las 6 velocidades disponibles. A esta señal responde el valor buscado por los sensores (gráfica gris) que busca el microcontrolador

variando el ciclo de trabajo de la señal PWM (gráfica verde). Tras modificar el ciclo de trabajo se puede comprobar que la señal real leída por el sensor (gráfica amarilla) varía hasta alcanzar el valor deseado que se ha configurado en el software. A pesar de un pequeño retraso en el tiempo de respuesta debido a la comunicación puerto-serie se puede decir que este sistema responde correctamente y alcanza el valor deseado y se mantiene en el mismo.

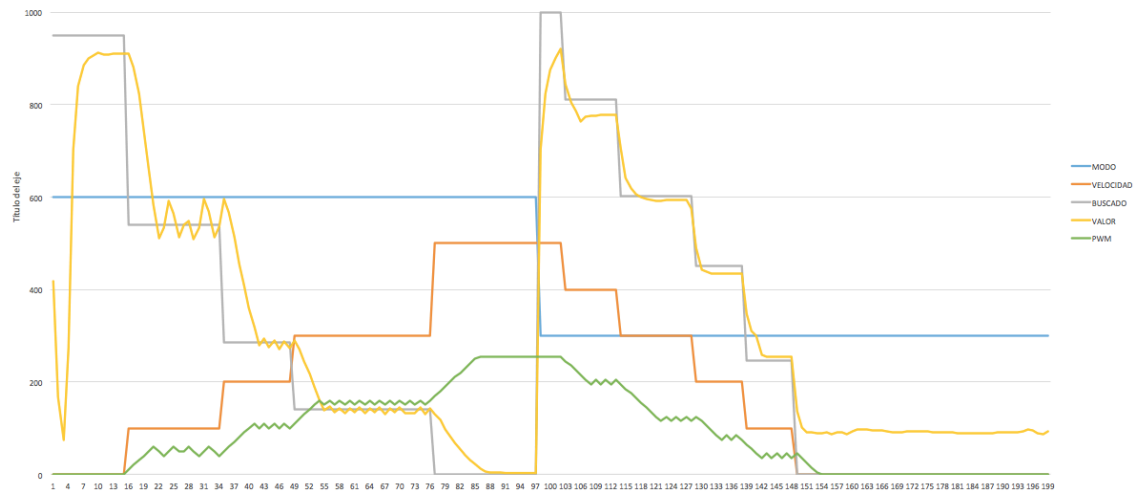


Imagen 46: Gráfica de resultados en pruebas en modo voltaje y modo corriente

En esta otra gráfica (mismo código de colores que la anterior) se puede observar el comportamiento del sistema en los dos modos de funcionamiento y cómo se invierten los sistemas para buscar el valor deseado. En el modo de tensión, para una mayor velocidad, existe un valor de tensión medido menor; mientras que en el modo de corriente, para una mayor velocidad, existe un valor de corriente medido mayor.

Viendo los resultados de estas pruebas y el comportamiento gracias a las gráficas anteriormente se puede decir que el sistema funciona correctamente y responde como cabe esperar ante las ordenes del usuario.

6.5. Manual de usuario

A continuación se detallará los procedimientos para la utilización del sistema que se desarrolla en el presente proyecto. Para ello se ha creado un manual de usuario.

Para comenzar, primero se deben tener en cuenta los elementos necesarios para la utilización del dispositivo:

- Placa impresa (PCB) con el sistema electrónico diseñado.
- Microcontrolador Arduino UNO, Duemilanove u otro microcontrolador similar con la misma huella y pines.
- Micromotor podológico alimentado a 48V. Puede utilizarse otro micromotor alimentado a distinta tensión, siempre y cuando se realicen los cambios oportunos en el software.
- Cable de alimentación USB, apto para adaptador Arduino. Cable de conexión USB Arduino-Ordenador si se va a realizar comunicación puerto-serie.
- Fuente de alimentación (48V).
- Cables para conectar fuente de alimentación con placa impresa.
- 3 tornillos de anclaje del microcontrolador Arduino a la placa impresa.

Cuando se dispone de todos los elementos anteriormente citados se puede proceder al montaje de los mismos.

- Apagar la fuente de alimentación.
- Anclar el microcontrolador Arduino a la placa impresa (PCB) utilizando los tres tornillos. Estos tornillos deben atravesar la placa impresa y los agujeros específicos del microcontrolador. Los pines deben entrar perfectamente en los adaptadores del microcontrolador. Este quedará anclado por debajo de la placa impresa.

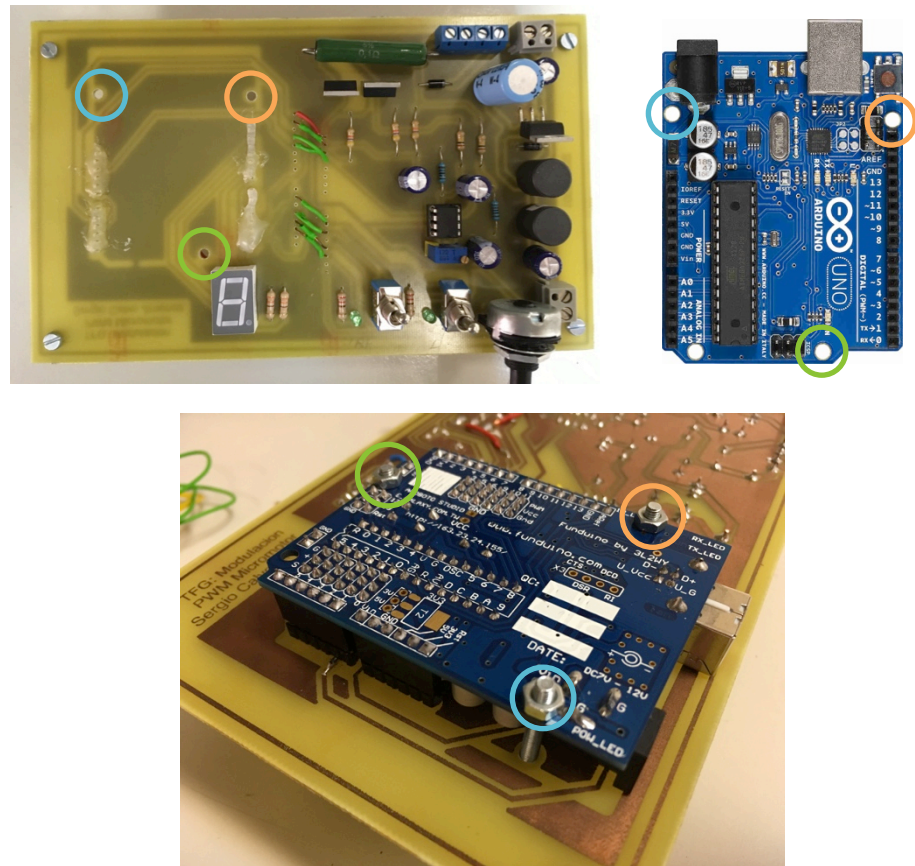


Imagen 47: Descriptivo de instalación del microcontrolador Arduino UNO

- Conectar el cable USB de alimentación del microcontrolador Arduino. En la clema de dos bornes correspondiente (ver siguiente imagen) se deben conectar el cable positivo (rojo) en el borne interior y el cable de masa (negro) en el borne exterior. El extremo con el adaptador USB se debe conectar al microcontrolador Arduino.



Imagen 48: Descriptivo de instalación de cables de alimentación al Arduino

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

- Conectar el micromotor a la placa, conectando los cables del micromotor en la clema correspondiente (ver siguiente imagen), cable rojo en el borne positivo y cable negro en el borne negativo.



Imagen 49: Descriptivo de instalación de cables del micromotor

- Conectar la placa a la fuente de alimentación a través de los cables conectados a la clema de dos bornes correspondiente (ver siguiente imagen), cable amarillo en el borne positivo y cable verde en el borne negativo.

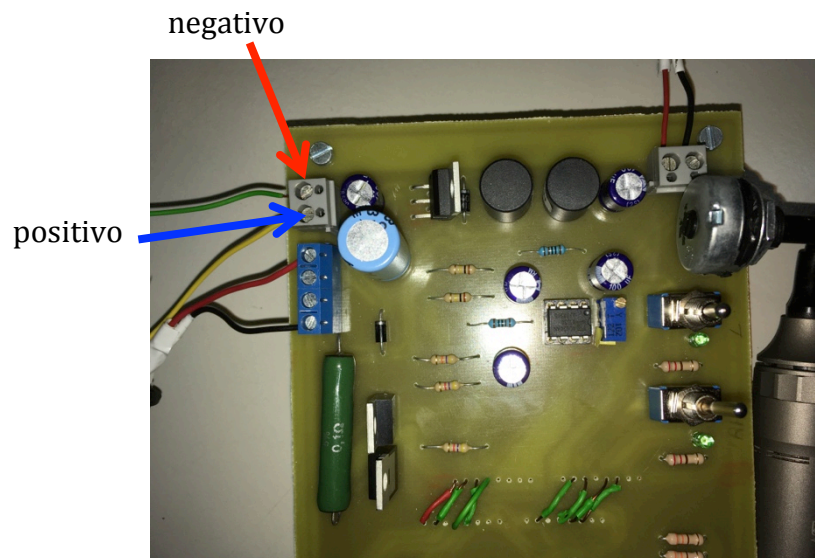


Imagen 50: Descriptivo de instalación de cables de alimentación

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

- Una vez conectados todos los elementos del sistema, girar completamente hasta el tope el potenciómetro en el sentido contrario a las agujas del reloj y poner el interruptor ON/OFF en posición OFF. De esta forma se asegura que al encender la fuente de alimentación, el motor estará en reposo.
- Conectar la fuente de alimentación a 48V. Deben de permanecer apagados los dos LEDs y el display aparecerá encendida el segmento central.
- Para activar el motor, cambiar el interruptor ON/OFF a la posición ON. Se encenderá uno de los dos LEDs de modo de funcionamiento (dependiendo el modo seleccionado) y el display mostrará un 0.
- Para cambiar la velocidad del motor:
 - Aumentar velocidad: girar el potenciómetro en sentido de las agujas del reloj.
 - Disminuir velocidad: girar el potenciómetro en sentido contrario a las agujas del reloj.

La velocidad del motor variará según la velocidad seleccionada. El display mostrará en todo momento la velocidad seleccionada, desde 0 hasta 5.

- Para seleccionar el modo de funcionamiento:
 - Modo Corriente: colocar el interruptor MODE en la posición CURR.
 - Modo Voltaje: colocar el interruptor MODE en la posición VOL.
- Para apagar el micromotor, girar el potenciómetro totalmente hasta el tope en el sentido contrario a las agujas del reloj, cambiar el interruptor ON/OFF en la posición OFF.
- Para desconectar el sistema completo, apagar la fuente de alimentación.



7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

Una vez diseñado e implementado el sistema de control de un micromotor podológico por señal PWM controlada por un microcontrolador Arduino, se recogen obtener las siguientes conclusiones recogidas en este apartado.

Todos los diseños realizados explicados en este proyecto se han implementado de forma física obteniendo un resultado final positivo. Además, se puede afirmar que el control de un micromotor a través de una señal PWM es fácilmente modulable y por tanto, facilita el control y monitoreo del mismo. El microcontrolador utilizado para este proyecto, un Arduino, es también un dispositivo de manejo sencillo y que se comercializa de forma extendida y a coste bajo, permitiendo una gran versatilidad. El resto de componentes también son de un uso comercial, exceptuando el micromotor podológico, aunque este sistema puede ser implementado para el control de otros tipos de micromotores, ampliando notablemente su campo de acción.

Por tanto, se puede decir, que este proyecto ha conseguido los objetivos marcados al principio del mismo:

- Diseño e implementación de un sistema de control PWM de un micromotor podológico.
- Diseño de software de control PWM con microcontrolador Arduino.
- Implementación física del sistema.
- Validación experimental del sistema de control PWM.

Partiendo de la labor realizada en este Trabajo de Fin de Grado, surgen las siguientes líneas de trabajo futuras:

- Pedal podológico de control de velocidad.

Las herramientas comúnmente utilizadas para entornos médicos (cirugía, odontología o podología) se requiere de un sistema cómodo y sencillo para la regulación de la velocidad de los micromotores utilizados a la vez que se hace uso del mismo. Por ello, en este tipo de sistemas se recomienda el uso de un pedal que ayude a regular la velocidad. En este sistema el impacto de este elemento es bajo.

- Inversión del sentido de giro del micromotor.

También es común que las fresas utilizadas en estos entornos comentados tengan distinta función dependiendo del sentido de giro de la misma. Por tanto, una buena funcionalidad a implementar en este sistema sería el control de sentido de giro y poder cambiar el mismo. En este caso se debería modificar la etapa de control de usuario para que este pudiera



seleccionar el giro. También habría que adaptar el circuito eléctrico para provocar el cambio de polaridad del micromotor.

- Versatilidad de motores podológicos.

En una mesa podológica (o entornos similares) es común la utilización de diversas herramientas para una misma intervención. Por ello, una línea de trabajo para este proyecto puede ser la ampliación de este sistema a diferentes micromotores podológicos, de forma que con un único sistema se puedan controlar esos micromotores. El impacto de esta ampliación es mayor puesto que se debería acoplar el sistema a las necesidades y requisitos de cada uno de los micromotores, tanto en la etapa de control de usuario, como en el software y hardware.



8. PRESUPUESTO Y CRONOGRAMA

8.1. Presupuesto

En la siguiente tabla se detallan los gastos económicos en materiales de este proyecto. Como se puede comprobar, los componentes electrónicos tiene una amplia comercialización que hacen reducir su coste. A su vez, el microcontrolador Arduino también tiene un coste relativamente bajo comparado con otros microcontroladores. La parte menos económica del proyecto es el micromotor podológico. Sin embargo, hay que tener en cuenta la especificación de dicha herramienta.

Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Precio Total (€)
AD620 (Amplificador de Instrumentación)	1	7,47	7,47
TL2575HV-05 (Regulador de tensión)	1	2,03	2,03
Transistor IRF530	2	0,85	1,70
Diodo 1N4007	2	0,21	0,42
Diodo LED	2	0,18	0,36
Condensador electrolítico 100uF	5	0,68	3,40
Condensador electrolítico 300uF	1	0,73	0,73
Bobina 20uH	1	0,54	0,54
Bobina 33uH	1	0,54	0,54
Resistencia 0,1Ω 10W	1	1,34	1,34
Resistencia 220Ω 1/4W	4	0,60	2,40
Resistencia 1kΩ 1/4W	2	0,60	1,20
Resistencia 4k7Ω 1/4W	2	0,60	1,20
Resistencia 43kΩ 1/4W	1	0,60	0,60
Resistencia 100kΩ 1/4W	2	0,60	0,60
Potenciómetro 10kΩ	1	0,86	0,86
Display 7 segmentos	1	1,79	1,79
Interruptor	2	1,55	3,10
Tira de pines 8	4	0,44	1,76
Zócalo 8 vías	2	0,82	1,64
Tornillo PCB	4	0,62	2,48
Clema	4	0,63	2,52
Microcontrolador Arduino	1	22,00	22,00
Micromotor podológico	1	280,00	280,00
Material diverso: estaño, malla soldar, cables, placa PCB, etc.	-	-	15,78
TOTAL:			356,73€

Tabla 26: Presupuesto de materiales

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

A continuación se presenta otra tabla con los gastos económicos de personal. Se debe tener en cuenta que la dedicación media para este proyecto serían 4 horas durante 5 días a la semana. Como se puede ver en el siguiente apartado, la duración de este proyecto ha sido de 20 semanas.

Actividad	Precio por hora (€)	Precio Total (€)
Diseño del sistema HW	11,00	660,00
Implementación del sistema HW	11,00	880,00
Diseño del sistema SW	11,00	660,00
Pruebas y ensayos del sistema	11,00	880,00
Documentación del proyecto	8.00	960,00
TOTAL:		4.040,00€

Tabla 27: Presupuesto de personal

Por tanto, el presupuesto total de este proyecto es:

Descripción	Precio Total (€)
Materiales	356,73
Personal	4.040,00
TOTAL:	4.396,73€

Tabla 28: Presupuesto total

8.2. Cronograma

En la siguiente tabla se representa la duración en la que se ha desarrollado el presente proyecto, dividido por las diferentes partes o tareas del mismo. De media, se ha dedicado 4 horas al día durante 5 días a la semana, como se detalla en el presupuesto.

Tarea	Semana																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Estudio del 'estado de arte' del sistema e investigación de tecnología actual	■																			
Planificación y objetivos del proyecto	■	■																		
Diseño del circuito electrónico (EAGLE)		■	■	■																
Validación del diseño de circuito electrónico				■																
Diseño del software de control microcontrolador (Arduino)					■	■	■													
Validación del diseño del software de control							■													
Diseño del circuito impreso PCB (EAGLE)								■	■	■										
Impresión de circuito impreso PCB										■										
Creación de BOM y adquisición de componentes										■										
Implementación física del sistema											■	■	■							
Implementación y pruebas del sistema por etapas (HW y SW)												■	■							
Implementación y pruebas del sistema completo													■	■	■	■				
Resolución de problemas y mejoras				■			■						■	■	■	■				
Documentación de procesos y memoria	■	■		■			■			■				■	■	■	■	■	■	■

Tabla 29: Cronograma



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Jesús Fraile Mora, *“Maquinas Eléctricas”*, 5ª edición McGraw-Hill 2003.
- [2]. *“Motores Eléctricos de Corriente Continua (c.c.)”*, disponible en:
<http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//4750/4933/html/index.html>
- [3]. *“Monografía: Motores de Corriente Directa (C.D)”*, disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos74/motores-corriente-directa/motores-corriente-directa.shtml>
- [4]. Jorge Eduardo Quintero Muñoz, *“Instrumentación Médica”*, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), 2005.
- [5]. *“Ingeniería Biomédica”*, disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_biom%C3%A9dica
- [6]. Juan F. Guerrero Martínez, *“Sistemas de Instrumentación Médica”*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Valencia, 2011.
- [7]. Leonor Ramírez Andrés, *“Instrumental para las técnicas de cirugía de mínima incisión”*, 2005.
- [8]. ISHAM, Stephen S., *“MIS Instrumentation”*, 2003.
- [9]. GORMAN, Jack B., *“Miniman Incision Surgery and Laser Surgery in Podiatry”*, USA 1983.
- [10]. Especificaciones micromotores podológicos NAMROL, disponible en:
<http://www.namrol.com>
- [11]. Especificaciones micromotores podológicos TEDEGAL, disponible en:
<http://www.tedegal.es>
- [12]. Especificaciones micromotores podológicos NSK, disponible en:
<http://www.spain.nsk-dental.com/products/laboratory>
- [13]. *“Control, velocidad y sentido de un motor DC”*, disponible en:
<http://diymakers.es/control-velocidad-y-sentido-de-motor-dc/>
- [14]. Fernando Martín Monar, *“Problemas de Ingeniería de Control para Sistemas Discretos”*, Copy Red Ed. 2013.
- [15]. Javier García, *“Sistemas de Control: Lazo Abierto – Lazo Cerrado”*, 2014.

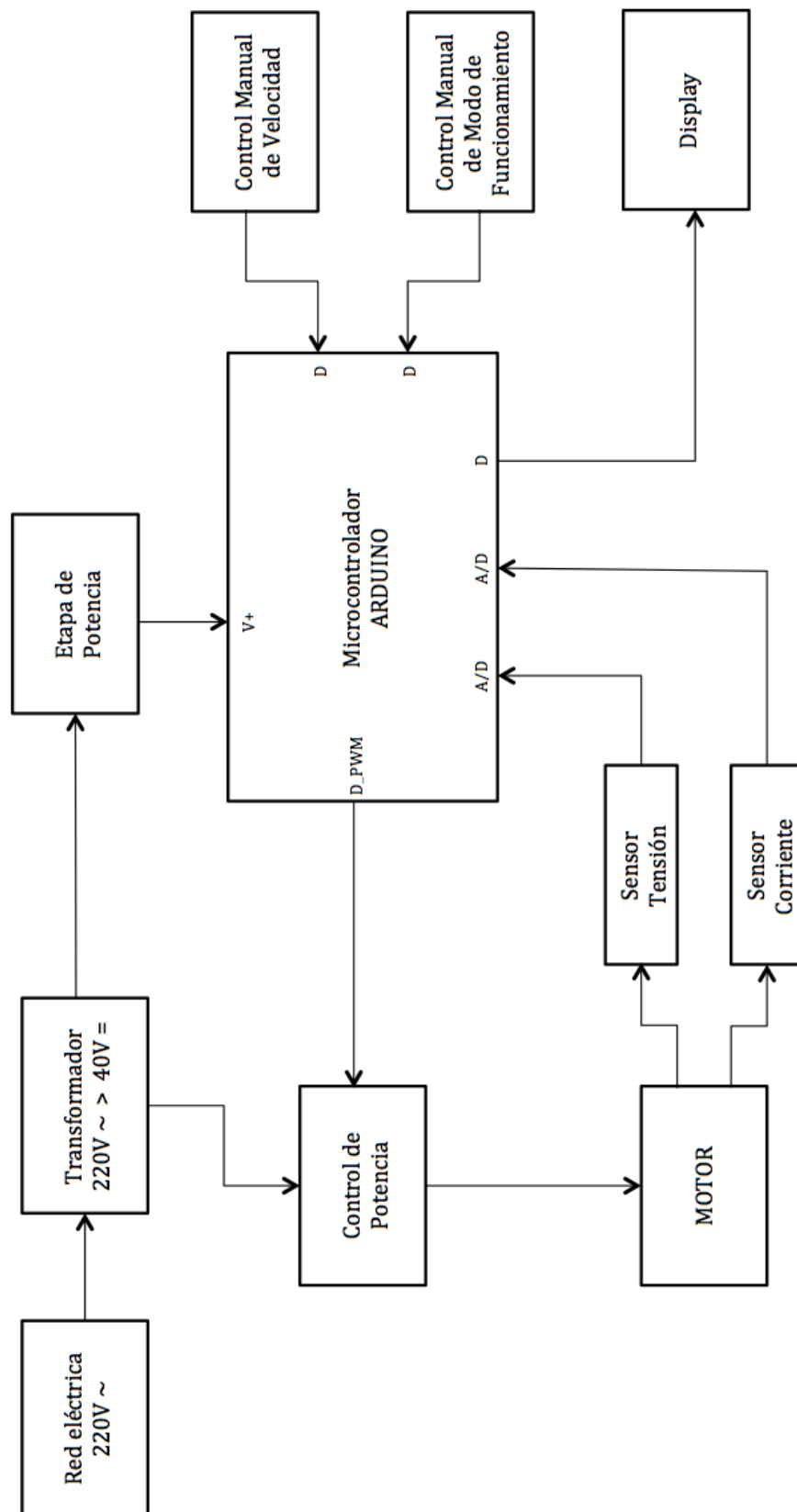


- [16]. Especificaciones microcontrolador Arduino, disponible en:
www.arduino.cc

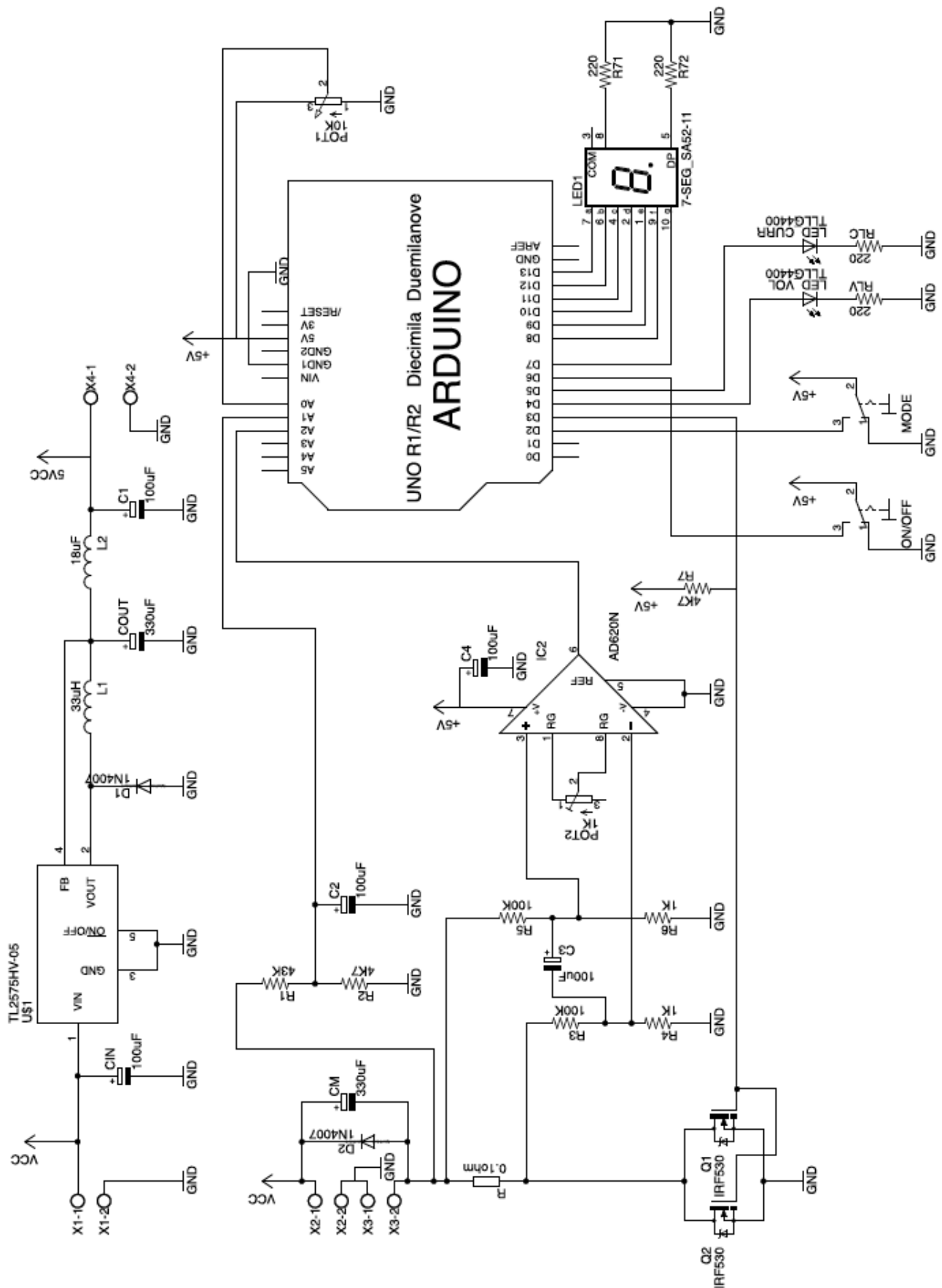


10. ANEXOS

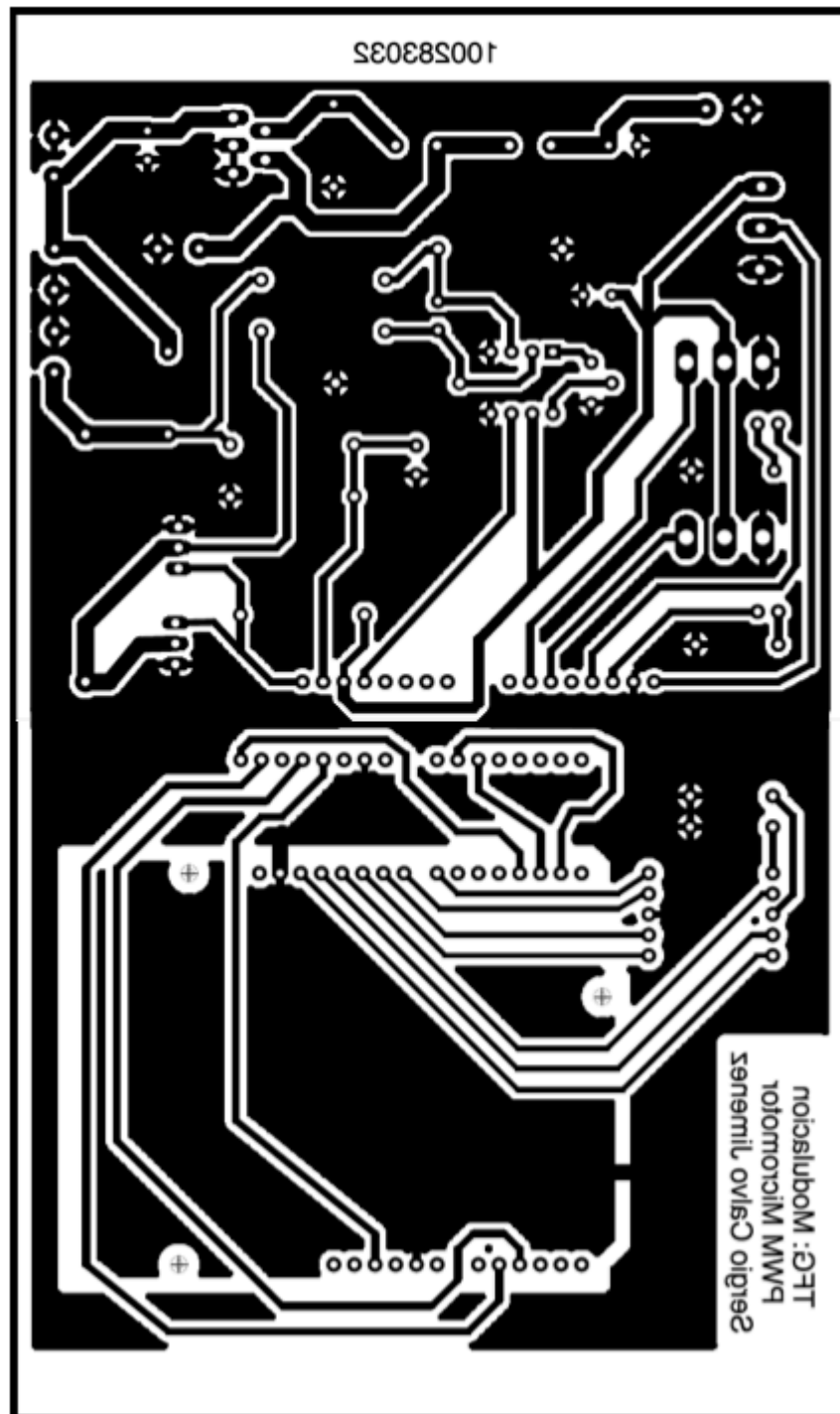
I. Diagrama de bloques del sistema



II. Plano del esquema eléctrico



III. Fotolito PCB



IV. Código Software

//CONSTANTES UTILIZADAS

```
const int numleds = 7;           //numero 7 segmentos
const int potPin = A0;           //entrada analogica potenciómetro
const int VPin = A1;             //entrada analogica lector voltaje
const int CPin = A2;             //entrada analogica lector corriente
const int IVol = 6;              //entrada digital interruptor voltaje
const int ICur = 2;             //entrada digital interruptor corriente
const int ledVol = 4;            //salida digital led voltaje
const int ledCur = 5;           //salida digital led corriente
const int PWM = 3;               //salida digital PWM
const int Vmax = 40;             //valor máximo de voltaje (v)
int ledPins[] = {7, 8, 9, 10, 11, 12, 13}; //array de salidas 7 segmentos
```

//VARIABLES UTILIZADAS EN PROGRAMA PRINCIPAL

```
int IVoltage;                    //Valor leído por interruptor de voltaje: HIGH o LOW
int ICurrent;                   //Valor leído por interruptor de corriente: HIGH o LOW
int MODE;                       //Modo de funcionamiento: 0 => OFF | 1 => CURRENT | 2 =>
                                VOLTAGE | 5 => ERROR
int potRead;                    //Valor leído por entrada analógica del Potenciómetro: 0 - 1023
int VolRead;                    //Valor leído por entrada analógica del lector de voltaje: 0 - 1023
int CurRead;                    //Valor leído por entrada analógica del lector de corriente: 0 -
                                1023
int SPEED;                      //Velocidad introducida de motor: 0 - 5
int VALUE;                      //Valor al que queremos llegar de voltaje o corriente según
                                SPEED: 0 - 1023
int VOLTAGE;                    //Valor al que queremos llegar de voltaje según SPEED: 0 - 1023
int CURRENT;                    //Valor al que queremos llegar de corriente según SPEED: 0 -
                                1023
int PWM_value;                 //Valor
int TIEMPO;                    //Variable utilizada para comunicación Puerto-Serie
int SPEED_100;                 //Variable utilizada para comunicación Puerto-Serie
int V_MEDIDO;                  //Variable utilizada para comunicación Puerto-Serie
```

//PROGRAMA DE CONFIGURACIÓN

```
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
    for (int led = 0; led < numleds; led++) {
        pinMode(ledPins[led], OUTPUT);
    }
    pinMode(IVol, INPUT);
    pinMode(ICur, INPUT);
    pinMode(ledVol, OUTPUT);
    pinMode(ledCur, OUTPUT);
    pinMode(PWM, OUTPUT);
}
```



```
PWM_value = 0;
TIEMPO = 0;
analogWrite(PWM,PWM_value);
}

//PROGRAMA PRINCIPAL
void loop() {

  //Lee Modo de Funcionamiento
  IVoltage = digitalRead(IVol);
  ICurrent = digitalRead(ICur);
  MODE = modo_funcionamiento(ICurrent, IVoltage);

  if (MODE != 0){
    //Lee valor de Potenciometro (velocidad) y enciende 7segmentos
    potRead = analogRead(potPin);
    SPEED = map(potRead, 0, 900, 0, 5); //1023 paso a 1000 para llegar antes a la
    velocidad máxima
    segmentos(SPEED);
    VALUE = conf_valores(SPEED,MODE);

    if (MODE == 1){          //MODO 1 = CURRENT
      //Lee valor de lector de corriente
      CurRead = analogRead(CPin);

      if (CurRead == VALUE){
        PWM_value = PWM_value;
      }
      else if (CurRead > VALUE){
        PWM_value = PWM_value - 10;
      }
      else if (CurRead < VALUE){
        PWM_value = PWM_value + 10;
      }

      if (PWM_value < 0) PWM_value = 0;
      if (PWM_value > 255) PWM_value = 255;

      V_MEDIDO = CurRead;
    } //FIN if (MODE == 1)

    else if (MODE == 2){      //MODO 2 = VOLTAGE

      //Lee valor de lector de voltaje
      VolRead = analogRead(VPin);

      if (VolRead == VALUE){
        PWM_value = PWM_value;
      }
    }
  }
}
```

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

```
else if (VolRead > VALUE){
  PWM_value = PWM_value + 10;
}
else if (VolRead < VALUE){
  PWM_value = PWM_value - 10;
}

if (PWM_value < 0) PWM_value = 0;
if (PWM_value > 255) PWM_value = 255;

V_MEDIDO = VolRead;

} //FIN IF (MODE == 2)
//PWM_value = 0;
analogWrite(PWM,PWM_value);
```

//CODIGO UTILIZADO EN LA CUMUNICACION PUERTO-SERIE

```
//Segun valor de velocidad modula señal PWM
//modulacion_PWM(SPEED);
SPEED_100 = SPEED * 100;
TIEMPO = TIEMPO + 1;

//*****CONTROL DE VARIABLES*****//
//Lectura de valores de variables para almacenar en archivo .CSV
Serial.print(TIEMPO);
Serial.print(";");
Serial.print(MODE*300);
Serial.print(";");
//Serial.print("potRead: ");
//Serial.println(potRead);
//Serial.print("SPEED: ");
Serial.print(SPEED_100);
Serial.print(";");
//Serial.print("VALUE: ");
Serial.print(VALUE);
Serial.print(";");
//Serial.print("VolRead: ");
//Serial.println(VolRead);
//Serial.print("CurRead: ");
Serial.print(V_MEDIDO);
Serial.print(";");
Serial.print(PWM_value);
Serial.println(";");
//Serial.print("PWM_value: ");
//Serial.println(PWM_value);
//Serial.print("MODE: ");
delay(500);
//*****CONTROL DE VARIABLES*****//
```



```
}
else{
  analogWrite(PWM,0);
  segmentos(9);
}

}

//*****FUNCIONES*****//

//Función Modo de Funcionamiento (Voltaje o Corriente)
// ICurrent(a) IVOLTAGE(b) | MODE
// 0      0    | OFF [0](no hay corriente en Arduino)
// 0      1    | OFF [0](no hay corriente en Arduino)
// 1      0    | CURRENT [1]
// 1      1    | VOLTAGE [2]
//
int modo_funcionamiento(int a, int b){
  int result;
  switch (a){
    case LOW:
      digitalWrite(ledVol, LOW);
      digitalWrite(ledCur, LOW);
      result = 0;
      break;
    case HIGH:
      switch (b){
        case LOW: //CURRENT MODE
          digitalWrite(ledVol, LOW);
          digitalWrite(ledCur, HIGH);
          result = 1;
          break;
        case HIGH: //VOLTAGE MODE
          digitalWrite(ledVol, HIGH);
          digitalWrite(ledCur, LOW);
          result = 2;
          break;
        default: //ERROR
          digitalWrite(ledVol, HIGH);
          digitalWrite(ledCur, HIGH);
          result = 5;
          break;
      }
      break;
    default: //ERROR
```

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

```
    digitalWrite(ledVol, HIGH);
    digitalWrite(ledCur, HIGH);
    result = 5;
    break;
}
return result;
}
//Fin funcion modo_funcionamiento

//Función de configuración de valores
// Según el valor leído por el potenciómetro configura
// unos valores objetivos tanto de voltaje como de corriente.
//
int conf_valores(int a, int b){
    switch (a){
        case 0:
            VOLTAGE = 950;    //0%
            CURRENT = 0;
            break
        case 1:
            //CURRENT = 0;
            VOLTAGE = 540;    //20%
            CURRENT = 247;
            break;
        case 2:
            VOLTAGE = 285;    //40%
            CURRENT = 452;
            break;
        case 3:
            VOLTAGE = 140;    //60%
            CURRENT = 603;
            break;
        case 4:
            VOLTAGE = 55;     //80%
            CURRENT = 811;
            break;
        case 5:
            VOLTAGE = 1;      //100%
            CURRENT = 1000;
            break;
        default:
            VOLTAGE = 950;    //0%
            CURRENT = 0;
            break;
    }
    if (b == 1){return CURRENT;}
    else if (b == 2){return VOLTAGE;}
}
```

//Función Encendido 7 Segmentos

```
//
//      1
//  _____
//  |         |
//  |         |
//  | 2       | 0
//  |         |
//  |-----3-----|
//  |         |
//  | 6       | 4
//  |         |
//  |         |
//  |_____|5_____|
//
```

```
void segmentos(int a){
  switch (a){
    case 0:
      digitalWrite(ledPins[0],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[1],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[2],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[3],LOW);
      digitalWrite(ledPins[4],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[5],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[6],HIGH);
      break;
    case 1:
      digitalWrite(ledPins[0],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[1],LOW);
      digitalWrite(ledPins[2],LOW);
      digitalWrite(ledPins[3],LOW);
      digitalWrite(ledPins[4],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[5],LOW);
      digitalWrite(ledPins[6],LOW);
      break;
    case 2:
      digitalWrite(ledPins[0],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[1],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[2],LOW);
      digitalWrite(ledPins[3],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[4],LOW);
      digitalWrite(ledPins[5],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[6],HIGH);
      break;
    case 3:
      digitalWrite(ledPins[0],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[1],HIGH);
      digitalWrite(ledPins[2],LOW);
```

Diseño de un controlador de velocidad para micromotor podológico con modulación PWM

```
digitalWrite(ledPins[3],HIGH);
digitalWrite(ledPins[4],HIGH);
digitalWrite(ledPins[5],HIGH);
digitalWrite(ledPins[6],LOW);
break;
case 4:
digitalWrite(ledPins[0],HIGH);
digitalWrite(ledPins[1],LOW);
digitalWrite(ledPins[2],HIGH);
digitalWrite(ledPins[3],HIGH);
digitalWrite(ledPins[4],HIGH);
digitalWrite(ledPins[5],LOW);
digitalWrite(ledPins[6],LOW);
break;
case 5:
digitalWrite(ledPins[0],LOW);
digitalWrite(ledPins[1],HIGH);
digitalWrite(ledPins[2],HIGH);
digitalWrite(ledPins[3],HIGH);
digitalWrite(ledPins[4],HIGH);
digitalWrite(ledPins[5],HIGH);
digitalWrite(ledPins[6],LOW);
break;
default:
digitalWrite(ledPins[0],LOW);
digitalWrite(ledPins[1],LOW);
digitalWrite(ledPins[2],LOW);
digitalWrite(ledPins[3],HIGH);
digitalWrite(ledPins[4],LOW);
digitalWrite(ledPins[5],LOW);
digitalWrite(ledPins[6],LOW);
break;
}
}
//Fin función Encendido 7 Segmentos
```

V. Lista de materiales (BOM)

Componente	Valor	Unidades	Descripción
AD620	-	1	Amplificador de Instrumentación
TL2575HV-05	5v	1	Regulador de Tensión
IRF530	-	2	Transistor
1N4007	-	2	Diodo
Diodo LED	-	2	-
Condensador	100uF	5	Electrolítico
Condensador	300uF	1	Electrolítico
Bobina	20uH	1	-
Bobina	33uH	1	-
Resistencia	0,1Ω 10W	1	-
Resistencia	220Ω 1/4W	4	-
Resistencia	1kΩ 1/4W	2	-
Resistencia	4k7Ω 1/4W	2	-
Resistencia	43kΩ 1/4W	1	-
Resistencia	100kΩ 1/4W	2	-
Potenciómetro	10kΩ	1	-
Display 7 segmentos	-	1	-
Conmutador	-	2	-
Tira de pines	8 pines	4	-
Zócalo	8 vías	2	-
Tornillo PCB	-	4	-
Clema	-	4	-

VI. Hojas de características de componentes

i. AD620



Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier

AD620

FEATURES

Easy to use

- Gain set with one external resistor
(Gain range 1 to 10,000)
- Wide power supply range (± 2.3 V to ± 18 V)
- Higher performance than 3 op amp IA designs
- Available in 8-lead DIP and SOIC packaging
- Low power, 1.3 mA max supply current

Excellent dc performance (B grade)

- 50 μ V max, input offset voltage
- 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, input offset drift
- 1.0 nA max, input bias current
- 100 dB min common-mode rejection ratio ($G = 10$)

Low noise

- 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz, input voltage noise
- 0.28 μ V p-p noise (0.1 Hz to 10 Hz)

Excellent ac specifications

- 120 kHz bandwidth ($G = 100$)
- 15 μ s settling time to 0.01%

APPLICATIONS

- Weigh scales
- ECG and medical instrumentation
- Transducer interface
- Data acquisition systems
- Industrial process controls
- Battery-powered and portable equipment

CONNECTION DIAGRAM

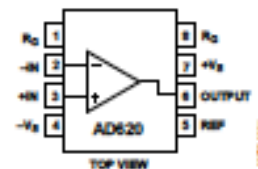


Figure 1. 8-Lead PDIP (P), CERDIP (C), and SOIC (S) Packages

PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to 10,000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery-powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50 μ V max, and offset drift of 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weigh scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications, such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of SuperBeta processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz, 0.28 μ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, and 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15 μ s to 0.01%, and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

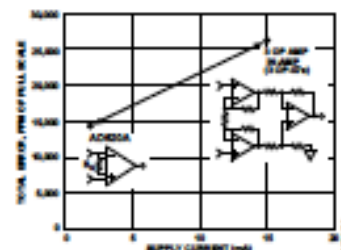


Figure 2. Three Op Amp IA Designs vs. AD620

Table 1. Next Generation Upgrades for AD620

Part	Comment
AD8221	Better specs at lower price
AD8222	Dual channel or differential out
AD8226	Low power, wide input range
AD8220	JFET input
AD8228	Best gain accuracy
AD8295	+2 precision op amps or differential out
AD8429	Ultra low noise

AD620

SPECIFICATIONS

Typical @ 25°C, $V_s = \pm 15$ V, and $R_L = 2$ k Ω , unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD6205 ¹			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN											
Gain Range	$G = 1 + (49.4 \text{ k}\Omega/R_L)$	1		10,000	1		10,000	1		10,000	
Gain Error ²	$V_{out} = \pm 10 \text{ V}$										
G = 1			0.03	0.10		0.01	0.02		0.03	0.10	%
G = 10			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 100			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 1000			0.40	0.70		0.35	0.50		0.40	0.70	%
Nonlinearity	$V_{out} = -10 \text{ V to } +10 \text{ V}$										
G = 1–1000	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$		10	40		10	40		10	40	ppm
G = 1–100	$R_L = 2 \text{ k}\Omega$		10	95		10	95		10	95	ppm
Gain vs. Temperature	G = 1			10			10			10	ppm/°C
	Gain > 1 ²			–50			–50			–50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET											
(Total RTI Error = $V_{os} + V_{os}/G$)											
Input Offset, V_{os}	$V_s = \pm 5 \text{ V to } \pm 15 \text{ V}$		30	125		15	50		30	125	μV
Overtemperature	$V_s = \pm 5 \text{ V to } \pm 15 \text{ V}$			185			85			225	μV
Average TC	$V_s = \pm 5 \text{ V to } \pm 15 \text{ V}$		0.3	1.0		0.1	0.6		0.3	1.0	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, V_{os0}	$V_s = \pm 15 \text{ V}$		400	1000		200	500		400	1000	μV
Overtemperature	$V_s = \pm 5 \text{ V to } \pm 15 \text{ V}$			1500			750			1500	μV
	$V_s = \pm 5 \text{ V to } \pm 15 \text{ V}$			2000			1000			2000	μV
Average TC	$V_s = \pm 5 \text{ V to } \pm 15 \text{ V}$		5.0	15		2.5	7.0		5.0	15	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)	$V_s = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$										
G = 1		80	100		80	100		80	100		dB
G = 10		95	120		100	120		95	120		dB
G = 100		110	140		120	140		110	140		dB
G = 1000		110	140		120	140		110	140		dB
INPUT CURRENT											
Input Bias Current			0.5	2.0		0.5	1.0		0.5	2	nA
Overtemperature				2.5			1.5			4	nA
Average TC			3.0			3.0			8.0		pA/°C
Input Offset Current			0.3	1.0		0.3	0.5		0.3	1.0	nA
Overtemperature				1.5			0.75			2.0	nA
Average TC			1.5			1.5			8.0		pA/°C
INPUT											
Input Impedance											
Differential			10 2			10 2			10 2		G Ω , pF
Common-Mode			10 2			10 2			10 2		G Ω , pF
Input Voltage Range ³	$V_s = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 5 \text{ V}$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.2$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.2$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.2$	V
Overtemperature	$V_s = \pm 5 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.3$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.3$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.3$	V
		$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.4$	V
Overtemperature		$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 2.3$		$+V_s - 1.4$	V

ii. TL2575HV-05



TL2575, TL2575HV

SLVS838C – JANUARY 2008 – REVISED NOVEMBER 2014

TL2575, TL2575HV 1-A Simple Step-Down Switching Voltage Regulators

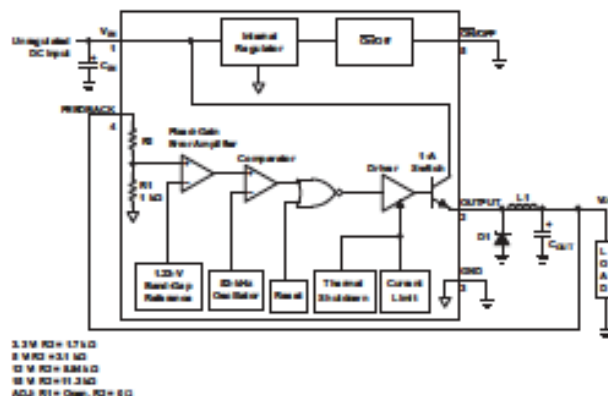
1 Features

- Fixed 3.3-V, 5-V, 12-V, and 15-V Options with $\pm 5\%$ Regulation (Max) Over Line, Load, and Temperature Conditions
- Adjustable Option With a Range of 1.23 V to 37 V (57 V for HV Version) and $\pm 4\%$ Regulation (Max) Over Line, Load, and Temperature Conditions
- Specified 1-A Output Current
- Wide Input Voltage Range
 - 4.75 V to 40 V (60 V for HV Version)
- Requires Only Four External Components (Fixed Versions) and Uses Readily Available Standard Inductors
- 52-kHz (Typ) Fixed-Frequency Internal Oscillator
- TTL Shutdown Capability With 50- μ A (Typ) Standby Current
- High Efficiency
 - As High as 88% (Typ)
- Thermal Shutdown and Current-Limit Protection with Cycle-by-Cycle Current Limiting

2 Applications

- Simple High-Efficiency Step-Down (Buck) Regulators
- Pre-Regulators for Linear Regulators
- On-Card Switching Regulators
- Positive-to-Negative Converters (Buck-Boost)

4 Functional Block Diagram



Pin numbers are for the KTT (TO-263) package.

3 Description

The TL2575 and TL2575HV devices provide all the active functions needed for a step-down (buck) switching regulator in an integrated circuit. They require four to six external components for operation. They accept a wide input-voltage range of up to 60 V (TL2575-HV) and are available in fixed output voltages of 3.3 V, 5 V, 12 V, 15 V, or an adjustable-output version. The TL2575 and TL2575HV devices have an integrated switch capable of delivering 1 A of load current, with excellent line and load regulation. The device also offers internal frequency compensation, a fixed-frequency oscillator, cycle-by-cycle current limiting, and thermal shutdown. In addition, a manual shutdown is available via an external ON/OFF pin.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TL2575, TL2575HV	PDIP (16)	19.31 mm x 6.35 mm
	TO-263 (5)	10.16 mm x 8.93 mm
	TO-220 (5)	10.16 mm x 8.82 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

TL2575, TL2575HV

SLVS638C – JANUARY 2006 – REVISED NOVEMBER 2014

www.ti.com

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings⁽¹⁾

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

			MIN	MAX	UNIT
V _{IN}	Supply voltage	TL2575HV		60	V
		TL2575		42	
ON/OFF input voltage range			-0.3	V _{IN}	V
Output voltage to GND (steady state)				-1	V
T _J	Maximum junction temperature			150	°C

(1) Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under Recommended Operating Conditions is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

7.2 Handling Ratings

			MIN	MAX	UNIT
T_{stg}	Storage temperature range		-65	150	°C
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001, all pins ⁽¹⁾	0	2000	V
		Charged device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101, all pins ⁽²⁾	0	1000	

(1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

(2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

7.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

			MIN	MAX	UNIT
V_{IN}	Supply voltage	TL2575HV	4.75	60	V
		TL2575	4.75	40	
T_J	Operating virtual junction temperature		-40	125	°C

7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		KTT	KV	N	UNIT
		5 PINS	5 PINS	18 PINS	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-ambient thermal resistance	26.5	26.5	67	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	Junction-to-case (top) thermal resistance	31.8	31.8	57	
$R_{\theta JC(bot)}$	Junction-to-case (bottom) thermal resistance	0.38	0.38	—	

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report (SPRA953).

iii. IRF530

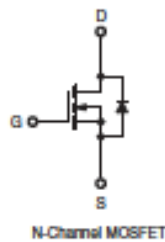


IRF530, SiHF530

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
V_{DS} (V)	100	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10$ V	0.16
Q_{gs} (Max.) (nC)	26	
Q_{gd} (nC)	5.5	
Q_{gss} (nC)	11	
Configuration	Single	



FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC



DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF530PbF SiHF530-E3
SnPb	IRF530 SiHF530

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T _C = 25 °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER			SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage			V _{DS}	100	V
Gate-Source Voltage			V _{GS}	± 20	
Continuous Drain Current	V _{GS} at 10 V	T _C = 25 °C	I _D	14	A
		T _C = 100 °C		10	
Pulsed Drain Current ^a			I _{DM}	50	
Linear Derating Factor				0.50	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy ^b			E _{AS}	60	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a			I _{AR}	14	A
Repetitive Avalanche Energy ^a			E _{AR}	8.8	mJ
Maximum Power Dissipation	T _C = 25 °C		P _D	88	W
Peak Diode Recovery dV/dt ^c			dV/dt	5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			T _J , T _{stg}	-55 to +175	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)		for 10 s		300 ^d	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw			10	lbf · in
				1.1	N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DS} = 25$ V, starting $T_J = 25$ °C, $L = 528$ μ H, $R_{\theta} = 25$ Ω , $I_{AS} = 14$ A (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 14$ A, $dV/dt \leq 140$ A/ μ s, $V_{DS} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 175$ °C.
- 1.6 mm from case.

* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Document Number: 91019
S11-0510-Rev. B, 21-Mar-11

www.vishay.com

1



This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc791000

IRF530, SiHF530

Vishay Siliconix



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	1.7	

SPECIFICATIONS (T _J = 25 °C, unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		MIN.	TYP.	MAX.	UNIT		
Static									
Drain-Source Breakdown Voltage	V _{DS}	V _{GS} = 0 V, I _D = 250 μA		100	-	-	V		
V _{DS} Temperature Coefficient	ΔV _{DS} /T _J	Reference to 25 °C, I _D = 1 mA		-	0.12	-	V/°C		
Gate-Source Threshold Voltage	V _{GS(th)}	V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250 μA		2.0	-	4.0	V		
Gate-Source Leakage	I _{GSS}	V _{GS} = ± 20 V		-	-	± 100	nA		
Zero Gate Voltage Drain Current	I _{DSS}	V _{DS} = 100 V, V _{GS} = 0 V		-	-	25	μA		
		V _{DS} = 80 V, V _{GS} = 0 V, T _J = 150 °C		-	-	250			
Drain-Source On-State Resistance	R _{DS(on)}	V _{GS} = 10 V	I _D = 8.4 A ^b	-	-	0.16	Ω		
Forward Transconductance	g _{fs}	V _{DS} = 50 V, I _D = 8.4 A ^b		5.1	-	-	S		
Dynamic									
Input Capacitance	C _{iss}	V _{GS} = 0 V, V _{DS} = 25 V, f = 1.0 MHz, see fig. 5		-	670	-	pF		
Output Capacitance	C _{oss}			-	250	-			
Reverse Transfer Capacitance	C _{rss}			-	60	-			
Total Gate Charge	Q _g	V _{GS} = 10 V	I _D = 14 A, V _{DS} = 80 V, see fig. 6 and 13 ^b	-	-	26	nC		
Gate-Source Charge	Q _{gs}			-	-	5.5			
Gate-Drain Charge	Q _{gd}			-	-	11			
Turn-On Delay Time	t _{d(on)}	V _{DD} = 50 V, I _D = 14 A R _g = 12 Ω, R _D = 3.6 Ω, see fig. 10 ^b		-	10	-	ns		
Rise Time	t _r			-	34	-			
Turn-Off Delay Time	t _{d(off)}			-	23	-			
Fall Time	t _f			-	24	-			
Internal Drain Inductance	L _D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact				-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L _S					-	7.5	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics									
Continuous Source-Drain Diode Current	I _S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode				-	-	14	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I _{SM}					-	-	50	
Body Diode Voltage	V _{SD}	T _J = 25 °C, I _S = 14 A, V _{GS} = 0 V ^b		-	-	2.5	V		
Body Diode Reverse Recovery Time	t _{rr}	T _J = 25 °C, I _S = 14 A, dI/dt = 100 A/μs ^b		-	150	280	ns		
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q _{rr}			-	0.85	1.7	μC		
Forward Turn-On Time	t _{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L _S and L _D)							

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- Pulse width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

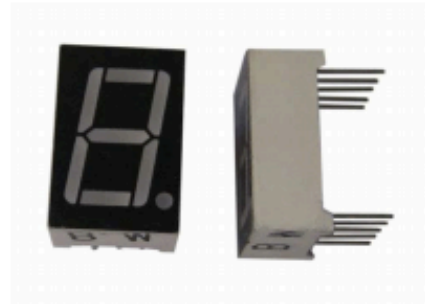
iv. Display 7 segmentos



Segment Digit LED Display

1.4 Common Cathode 0.56 Inch (14.20mm)

PRODUCT DESCRIPTION
(1) 0.56 Inch (14.20mm) Digit Height
(2) Low current operation
(3) Excellent color and font characteristics
(4) Colors: White, blue, red, yellow and green
(5) Gray or black color background
(6) Common Cathode
(7) RoHs Compliant Part



Absolute Maximum Rating (Ta = 25°C)

PARAMETER	RED	AMBER	GREEN	BLUE	WHITE	UNITS
DC Forward Current Per Segment	30	30	25	30	20	mA
Peak Current Per Segment ⁽¹⁾	70	50	50	25	25	mA
Avg. Forward Current (Pulse Operation) Per Segment	30	30	25	25	25	mA
Derating Linear From 25°C Per Segment	0.3					mA/°C
Reverse Voltage ⁽²⁾	3					V
Operating Temperature	-25 to +85					°C
Storage Temperature	-30 to +85					°C

(1) Pulse conditions of 1/10 duty and 0.1msec width, for long operating life, max. of 20mA recommended

(2) Reverse biasing of the dot matrix is not recommend, will cause damage to the leds

Electro-optical Characteristics (Ta = 25°C)

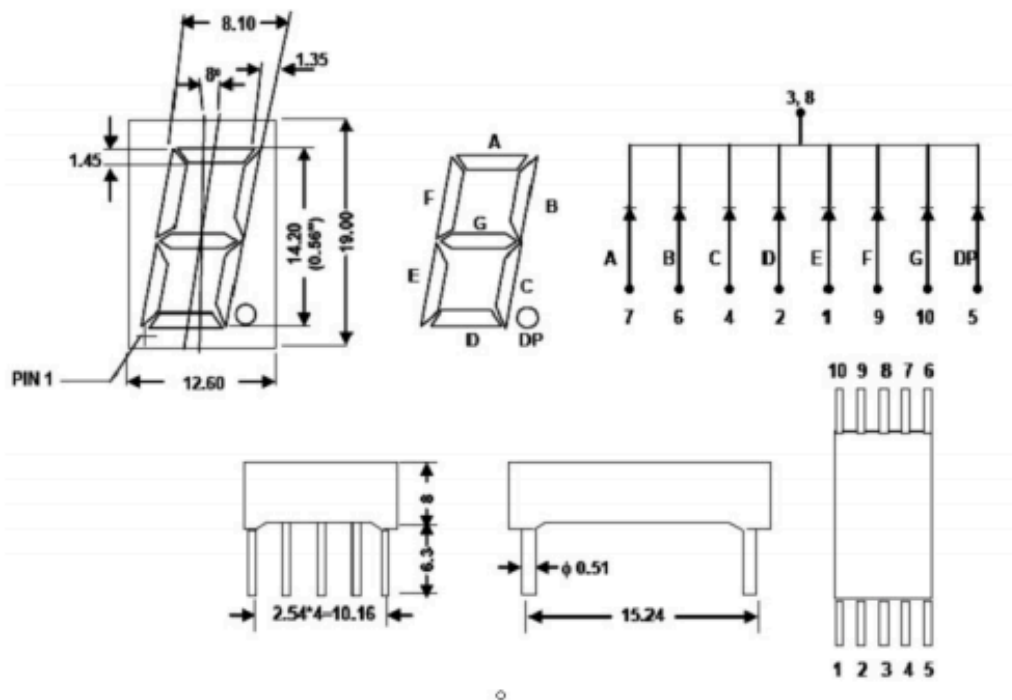
PART NUMBER	DICE MATERIAL (COLOR)	PEAK WAVELENGTH (nm)	MAX. REVERSE CURRENT / SEGMENT (uA)	VF (V) TYP	VF (V) MAX.	LUMINOUS INTENSITY / SEGMENT AVERAGE (IF = 10mA)
LEDS5612AUR1C	AlGaAs Red	660	10	1.8	2.3	10,000 ucd
LEDS5612TB1C	InGaN Blue	468	10	3.3	4.0	28,000 ucd
LEDS5612YG1C	GaP Green	568	10	1.9	2.3	12,000 ucd
LEDS5612UY1C	AlInGaP Amber	590	10	1.8	2.3	12,000 ucd
LEDS5612TW1C	InGaN White	5,500K	10	3.3	4.0	28,000 ucd



Segment Digit LED Display




DEVICE DIAGRAM

PIN NO.			
1	Anode E	6	Anode B
2	Anode D	7	Anode A
3	Common Cathode DIG. 1	8	Common Cathode DIG. 2
4	Anode C	9	Anode F
5	Anode DP	10	Anode G



VII. Listado de programas

En la siguiente tabla se detallan los programas principales utilizados para el desarrollo del proyecto.

Programa		SW Libre	Descripción	Link
	EAGLE	NO*	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño del esquema eléctrico del sistema. - Diseño del circuito impreso PCB 	https://www.element14.com/community/community/cadsoft_eagle/free_mium
	Arduino	SI	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollo del código SW. - Implementación e instalación del SW en microcontrolador. - Comunicación puerto-serie con el microcontrolador. 	https://www.arduino.cc/en/Main/Software
	Windows Microsoft Excel	NO	<ul style="list-style-type: none"> - Almacenamiento y procesamiento de los datos obtenidos durante pruebas. 	https://products.office.com/es/excel

*Disponible versión libre de prueba (30 días)



